

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

ROBSON PRUST

INFLUÊNCIA DO MATERIAL DAS PLACAS DE REFRIGERAÇÃO DO MOLDE NO
TEMPO DO CICLO DE INJEÇÃO PARA DIFERENTES POLÍMEROS

Joinville

2018

ROBSON PRUST

INFLUÊNCIA DO MATERIAL DAS PLACAS DE REFRIGERAÇÃO DO MOLDE NO
TEMPO DO CICLO DE INJEÇÃO PARA DIFERENTES POLÍMEROS

Trabalho de conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Automotiva, pela Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico de Joinville.

Orientador: Dr. Carlos Maurício Sacchelli.

Joinville

2018

ROBSON PRUST

INFLUÊNCIA DO MATERIAL DAS PLACAS DE REFRIGERAÇÃO DO MOLDE NO
TEMPO DO CICLO DE INJEÇÃO PARA DIFERENTES POLÍMEROS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Mauricio Sacchelli
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Adriano Fagali, de Souza
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Wagner Maurício Pachekoski
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

A Deus, que se mostrou criador, que foi criativo. Seu fôlego de vida em mim me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, por todo o apoio e incentivo que me proporcionaram durante a vida. Ao meu irmão, por estar sempre ao meu lado, se mostrando além de um irmão, um grande amigo. Aos meus padrinho e madrinha, a quem sou muito grato por todo o incentivo a mim dado. A família Tachewiski, que me acolheu logo que mudei para Joinville e esteve me ajudando sempre que precisei.

Agradeço ao meu professor e também orientador, pela oportunidade de participar do programa de Iniciação Científica, que deu origem a esse trabalho e pelo suporte dado ao longo da realização do mesmo. A todos os professores e funcionários que fizeram parte dessa jornada, ensinando e incentivando a ir cada vez mais longe.

Agradeço também a Universidade Federal de Santa Catarina, por ter oferecido a chance e todas as ferramentas para o meu crescimento intelectual e pessoal, e também por ter me dado a oportunidade de conhecer pessoas maravilhosas que se tornaram grandes amigos os quais pretendo carregar pelo resto da vida.

RESUMO

O desenvolvimento da tecnologia no setor de moldagem de polímeros está em crescente evolução. Neste cenário, o processo de injeção de termoplásticos vem se destacando devido à facilidade de produção em grande escala de peças de diversas geometrias. O processo de injeção consiste essencialmente em aquecer o polímero dentro de um cilindro até que atinja sua temperatura de trabalho. Uma rosca sem-fim desloca o polímero fundido para o interior do molde, com as formas da peça desejada. Após certo tempo dentro da cavidade, com o sistema de refrigeração atuando o polímero troca calor e se solidifica. A peça moldada é então, extraída do molde. Nesse ciclo o tempo de refrigeração tem grande importância, pois é o tempo mais longo do processo e, portanto, tem grande impacto na produtividade do processo além de influenciar a qualidade final do produto. Assim, essa pesquisa tem por objetivo analisar os sistemas de refrigeração e propor melhorias, visando aumentar a eficiência no ciclo de produção. Neste estudo serão descritas as simulações realizadas com o *software* computacional Moldflow® que permite a simulação de todo o processo, sendo desta maneira possível otimizar o ciclo de produção.

Com esse trabalho foi possível concluir que a utilização de materiais com maior condutividade térmica resulta em menor tempos de ciclo.

Palavras-chave: Molde de Injeção. Sistema de Refrigeração. Insertos. Moldflow®.

ABSTRACT

The development of technology in the polymer molding industry is growing. In this scenario, the injection process of thermoplastics has been outstanding due to the ease of large-scale production of parts of various geometries. The injection process essentially consists of heating the polymer inside a cylinder until it reaches its working temperature. An endless thread moves the molten polymer into the mold with the shapes of the desired part. After some time inside the cavity, with the cooling system acting the polymer exchanges heat and solidifies. The molded part is then extracted from the mold. In this cycle the cooling time is of great importance because it is the longest time in the process and therefore has a great impact on the productivity of the process besides influencing the final quality of the product. Thus, this research has as objective to analyze the refrigeration systems and to propose improvements, aiming to increase the efficiency in the production cycle. In this study we will describe the simulations carried out with the Moldflow® computational software, which allows the simulation of the entire process, in this way it is possible to optimize the production cycle.

With this work it was possible to conclude that the use of materials with higher thermal conductivity results in shorter cycle times.

Keywords: Injection Mold. Cooling System. Inserts. Moldflow®

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo básico do processo de injeção.	21
Figura 2 - Máquina injetora.....	22
Figura 3 - Estrutura esquemática de um molde de injeção.	23
Figura 4 - Esquema de transferência de calor através de uma parede.	30
Figura 5 - Transferência de calor, de uma superfície quente para o ar, por convecção.	32
Figura 6 - Circuito de refrigeração (a) em paralelo e (b) em série.	35
Figura 7 - Dimensões da peça.	41
Figura 8 - Geometria a ser simulada.	42
Figura 9 - Dimensões do porta molde utilizado como modelo.	42
Figura 10 - Criação do molde	43
Figura 11 - Distribuição dos canais de refrigeração.	43
Figura 12 - Escolha da posição do ponto de injeção.	47
Figura 13 - Sistema de refrigeração escolhido.	48
Figura 14 - Representação do sistema de refrigeração em placas.	48
Figura 15 - Desenho técnico das placas com os canais de refrigeração.	52
Figura 16 - Representação do sistema de refrigeração convencional (A) e com insertos (B), para as distâncias entre os canais de 48 mm e 58 mm.	53
Figura 17 - Dimensões do molde porta-cavidade.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades térmica de alguns polímeros.	19
Quadro 2- Características do cobre puro.	25
Quadro 3 - Características do aço carbono.....	27
Quadro 4 - Características das ligas Ampcoloy®.	28
Quadro 5- Modelos de sistema de refrigeração (Continuação).	36
Quadro 6 - Propriedade dos materiais utilizados nas simulações.	45
Quadro 7 - Regimes de escoamento conforme o número de <i>Reynolds</i>	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI H13.....	25
Tabela 2 - Condições iniciais da simulação.	46
Tabela 3 - Variação do número de Reynolds para injeção dos materiais selecionados.	50
Tabela 4 – Resultados das simulações variando o material dos incertos.	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análise do tempo de ciclo com a variação do número de Reynolds.....	51
Gráfico 2 - Tempo de ciclo para os materiais poliméricos injetados no sistema padrão H13.....	55
Gráfico 3 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção dos polímeros selecionados no sistema padrão H13 e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.	56
Gráfico 4 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção dos polímeros selecionados no sistema padrão H13 e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.	56
Gráfico 5 - Injeção de PP para cada material do inserto.	57
Gráfico 6 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do PP.....	58
Gráfico 7 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PP com cada inserto e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.....	59
Gráfico 8 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PP com cada inserto e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.....	60
Gráfico 9 - Injeção de ABS para cada material do inserto.....	61
Gráfico 10 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do ABS.....	61
Gráfico 11 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do ABS com cada inserto e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.....	62
Gráfico 12 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do ABS com cada inserto e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.....	63
Gráfico 13 - Injeção de PA para cada material do inserto.	64
Gráfico 14 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do PA.....	64
Gráfico 15 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PA com cada insertos e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.....	65
Gráfico 16 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PA com cada insertos e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.....	66
Gráfico 17 - Injeção de PET para cada material do inserto.....	67
Gráfico 18 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do PET.....	68
Gráfico 19 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PET, com cada insertos e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.....	69
Gráfico 20- Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PET, com cada insertos e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.....	70
Gráfico 21 - Injeção de PS para cada material do inserto.	71

Gráfico 22 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do PS.	72
Gráfico 23 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PS, com cada insertos e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.	73
Gráfico 24 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PS, com cada insertos e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
BMC	Poliéster (com Fibra de Vidro)
C	Carbono
CA	Acetato de Celulose
CAB	Acetato – Butirato de Celulose
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
Cr	Cromo
CR	Policloropreno
Cu	Cobre
dA	Variação da área
dT	Temperatura
dx	Variação da espessura
EMC	Epóxi
<i>g/cm³</i>	Grama por centímetro cúbico
HRC	Escala de dureza Rockwell C
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
K	Escala de temperature Kelvin
mm	Milímetros
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
<i>MPa</i>	Megapascal
PA	Poliamidas
PC	Policarbonato
PET	Polietileno Tereftalato
PMMA	Polimetilmetacrilato
POM	Polioximetileno (Acetal)
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno

PVC	Cloreto de Polivinila
PvT	Pressão – volume – temperatura
Re	Reynolds
s	Segundos
SAN	Acrilonitrila - Estireno
Si	Silício
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
T _g	Temperatura de transição vítrea
T _m	Temperatura de fusão
T _n	Temperatura de não-fluxo
U.F	Uréia – Formaldeído
V	Vanádio
Vs	Versus
W/m ²	Watts por metro quadrado
ΔQ	Variação da quantidade de calor
ΔT	Variação de temperatura
<i>d</i>	Diâmetro do canal
<i>U</i>	Velocidade do fluido
<i>η</i>	Viscosidade dinâmica;
<i>ρ</i>	Densidade do fluido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS.....	17
2.2 PROCESSO DE INJEÇÃO	19
2.3 MÁQUINA INJETORA.....	21
2.4 MOLDES DE INJEÇÃO	22
2.4.1 Material do Porta Cavidade e Insertos	23
2.4.1.1 Aço AISI H13	23
2.4.1.2 Cobre.....	25
2.4.1.3 Aço Carbono.....	26
2.4.1.4 Ligas Ampcoloy	27
2.5 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	28
2.5.1 Condução	29
2.5.2 Convecção.....	31
2.6 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	33
2.6.1 Tipos de sistema de refrigeração	34
2.6.2 Simulação de injeção	38
3 METODOLOGIA	40
3.1 GEOMETRIA	41
3.2 PORTA - MOLDE.....	42
3.3 MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA INJEÇÃO.....	44
3.3.1 Ponto de injeção do material	46
3.4 TIPO DE CANAL DE REFRIGERAÇÃO	47
3.5 ESCOAMENTO DO FLUIDO REFRIGERANTE	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	50
4.1 ESCOLHA DO NÚMERO DE REYNOLDS	50
4.2 CRIAÇÃO DAS PLACAS INSERTO PARA O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO.....	51
4.3 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO	52
4.3.1 Simulação do Sistema Padrão com aço H13.....	55
4.3.2 Simulação de Injeção do PP	57
4.3.3 Simulação de Injeção do ABS	60

4.3.4 Simulação de Injeção do PA	63
4.3.5 Simulação de Injeção do PET	66
4.3.6 Simulação de Injeção do PS	71
5 CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS.....	77
APÊNDICE A	80
ANEXO A.....	84

1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva está sempre inovando na tecnologia de fabricação de seus produtos. A busca pela otimização do desempenho incentiva a criação de veículos mais leves, com isso surgem novos materiais para serem empregados, desde peças mais simples até componentes mais complexos.

Com a redução do peso total do veículo, ocorrida com a substituição do material pesado (aço) pelo polímero, o carro obteve menor consumo de combustível e, conseqüentemente, diminuiu o nível de poluição emitida ao ambiente (SIMÕES et al., 2016).

Hoje, até mesmo espaços que eram considerados inóspitos, por causa das altas temperaturas e da contaminação por produtos químicos, já podem ser feitos de plástico, no motor, por exemplo, o cárter e galerias de combustível. Assim, os atuais 44 kg médios de plástico nos veículos substituem cerca de 350 kg de aço. Na Europa esse número já chega a 100 kg de plástico em automóveis. O percentual de plástico nos carros deve subir de atuais 15% para 25% a 30% em 2030. Este é um crescimento significativo e este tipo de matéria-prima pode conquistar um espaço ainda maior. (PLÁSTICO..., 2013)

Segundo Harada e Ueki (2012), existem diversos processos de transformação do polímero em produto final, dentre eles por extrusão, conformação direta, sopro, termoformagem, rotomoldagem, compressão, injeção.

Na modelagem por injeção, a matéria prima polimérica é aquecida para ser injetada sob pressão para dentro da cavidade de um molde, que dará a forma ao polímero, completamente solidificado. (HARADA e UEKI, 2012).

A moldagem por injeção de polímeros é um processo cíclico, que permite total automatização. Pode ser separado em três etapas: preenchimento, recalque e solidificação. O preenchimento é feito através de uma rosca que transporta uma certa quantidade de matéria prima aquecida, até o bico da máquina injetora. O material é inserido no molde sob alta pressão. Após a cavidade do molde ser totalmente preenchida, ocorre o 2º estágio de injeção, a pressão de recalque, ou empacotamento,

como também é conhecido. A pressão de recalque atua sobre o moldado visando a compactar o material e para compensar o encolhimento por contração (SACCHELLI, 2017)¹. O resfriamento da peça dura o tempo necessário para que a massa fundida se solidifique, de modo que o produto moldado adquira rigidez suficiente para suportar a força dos extratores mecânicos que retiram a peça do molde, sem comprometer sua forma. O molde então é aberto e a peça é extraída, geralmente sem necessidade de operações de acabamento, então o ciclo é repetido. (GRANADA, 2011; HARADA e UEKI, 2012).

A solidificação do material neste processo inicia a partir do momento em que o polímero fundido entra em contato com a superfície metálica do molde. (HARADA e UEKI, 2012). Essa é a etapa mais longa de todo o processo, cerca de três quartos do tempo total do ciclo de moldagem por injeção.

Desta maneira, há a necessidade de maiores estudos para objetivar a diminuição do tempo de resfriamento do ciclo de produção de um produto injetado. Alguns trabalhos encontrados tratam de parâmetros como temperatura de injeção do material polimérico, temperatura do fluido de refrigeração, distância entre os canais de refrigeração e a cavidade do molde, entre outros. Em seu trabalho Vojnová (2016), realizou um estudo onde compara o impacto de conformação e de arrefecimento convencional sobre a qualidade dos produtos plásticos. Já Silva (2009), criou um processo sistêmico para a atividade de projeto do sistema de refrigeração aplicado nos moldes para a injeção de materiais poliméricos.

Marin et al. (2018), desenvolveram um trabalho onde canais de refrigeração complexos, também conhecidos como *Conformal Cooling*, através de insertos intercambiáveis. Com o objetivo de reduzir o custo de fabricação, as partes mais simples dos insertos foram criados por processo de fresamento e as regiões mais complexas por Fusão Seletiva a Laser (SLM - *Selective Laser Melting*). Com a combinação dos dois processos de fabricação, além de baratear o custo de produção

¹ SACCHELLI, Carlos M. **Notas de aula**. Disciplina de Ferramentas e Dispositivos para a Indústria Automotiva, Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, SC, 2017.

dos insertos, o sistema produziu peças com menos deformações, se comparadas as peças produzidas por moldes com sistemas de refrigeração convencionais.

Contudo, como é possível reduzir o tempo de ciclo melhorando o tempo de refrigeração com alternativas de menor custo?

Assim, o presente estudo busca dar continuidade ao estudo de Berner (2016), onde buscou a melhor configuração de canais de refrigeração para uma geometria propor uma configuração alternativa de sistema de refrigeração, sendo esse construído em placas de diferentes materiais e inseridas no molde de injeção, afim de melhorar a capacidade de dissipação de calor e diminuir o tempo de ciclo do processo. O modelo proposto será simulado usando a ferramenta *Computer Aided Engineering* (CAE), através do *software* comercial *Moldflow®*. Os resultados serão comparados com simulações realizadas em sistema de injeção convencional.

OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma configuração alternativa de sistema de refrigeração, afim de melhorar a capacidade de dissipação de calor do molde, para diminuir o tempo do ciclo do processo de moldagem por injeção.

Os objetivos específicos são:

- Identificar as configurações de circuito de refrigeração mais usuais.
- identificar materiais com alto coeficiente de condutividade térmica para injeção e para o sistema de refrigeração do molde.
- Observar a influência do sistema de refrigeração proposto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAIS POLIMÉRICOS

O surgimento dos polímeros, após a Primeira Guerra Mundial, foi uma grande revolução que mudou radicalmente o modo de produção das indústrias, que de certa forma se adaptaram as novas condições de produção, dando o início a uma nova era, conhecida como a idade dos plásticos (SANTOS e MÓL, 2010).

Para Canevarolo (2006), polímeros são macromoléculas formadas por muitas unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma unidade de repetição. Dependendo do tipo de monômero, do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, podemos dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras. Esses podem ser naturais orgânicos, que são polímeros sintetizados pela natureza, artificiais, que são polímeros naturais orgânicos modificados pelo homem e sintéticos, que são polímeros sintetizados pelo homem.

O plástico é um material polimérico de alta massa molar, sólido como produto acabado, que pode ser subdividido em termoplásticos e termofixos. Os termoplásticos têm a capacidade de serem fundidos e solidificados várias vezes sem muita alteração na sua estrutura molecular. Já os termofixos não podem ser fundidos novamente após o processo de cura sem a degradação de sua estrutura (MANRICH, 2013).

Segundo Paiva (2006), ao solidificar, os termoplásticos podem assumir uma estrutura amorfa ou semicristalina, conforme as moléculas se arranjam ou se alinham relativamente umas às outras, formando regiões de ordem tridimensional.

O termo esferulito, é usado para definir arranjos ordenados de cristalinos que crescem a partir de um núcleo. Em um esferulito coexistem regiões amorfas e cristalinas, sendo que as regiões cristalinas têm como referência o primeiro cristal formado. No estado cristalino as moléculas estão mais próximas e, por isso, as forças intermoleculares estão ampliadas, gerando uma massa mais resistente a ações externas. Polímeros cristalinos são, na verdade, semicristalinos, com regiões cristalinas separadas da fase amorfa (MANRICH, 2005).

As moléculas que constituem uma massa polimérica no estado amorfo tendem a se configurarem de forma aleatória e desorganizada. Geram um grande número de interações moleculares, se enroscando umas nas outras, para atingirem o estado mais equilibrado. A força de atração entre as cadeias poliméricas é fraca, portanto, se esse sistema for afetado por forças ou tensões externas, ocorre o desequilíbrio do seu estado (MANRICH, 2005).

Os polímeros também podem ser caracterizados para suas aplicações pela sua densidade, transparência e índice de refração, rigidez dielétrica, grau de degradação, resistência química, coeficiente de expansão térmica entre outras propriedades (MANRICH, 2005).

A condutividade térmica dos polímeros é bem baixa, quando comparada com a condutividade dos materiais metálicos, e de alguns materiais cerâmicos. Do ponto de vista de processamento, a baixa condutividade térmica cria alguns problemas reais: ela limita a taxa com a qual o polímero pode ser aquecido e plastificado. No resfriamento, a baixa condutividade pode provocar não uniformidade de temperatura e encolhimento. Isto pode resultar em tensões de congelamento, deformação do extrudado, vazios de moldado, etc (SANTOS e GREGÓRIO, 2003).

O calor específico representa a quantidade de energia necessária para que cada grama de uma substância sofra uma variação de temperatura correspondente a 1°C. O calor específico de polímeros amorfos aumenta linearmente com a temperatura abaixo e acima da temperatura de transição vítrea (T_g), sendo que ao redor dessa temperatura ocorre uma variação brusca dessa propriedade. No caso de polímeros semicristalinos essa variação em T_g é menos pronunciada, ocorrendo, entretanto, um máximo distinto no ponto de fusão cristalino. Para uma estrutura cristalina perfeitamente uniforme o calor específico é teoricamente infinito no ponto de fusão. Desde que esse não é o caso de polímeros semicristalinos, esses materiais exibem no ponto de fusão um pico com uma certa largura. Quanto mais estreito for o pico mais uniforme é a morfologia cristalina. Acima do ponto de fusão o calor específico aumenta suavemente com a temperatura (SANTOS e GREGÓRIO, 2003).

As propriedades térmicas de um material plástico sólido, dependem da cristalinidade do material, portanto, essas propriedades variam de acordo com cada material, como pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades térmica de alguns polímeros.

	Nome Genérico	Abreviatura	Temperatura de transformação (°C)	Calor específico (J/kg°C)	Condutividade Térmica (W/m°C)
Termoplásticos	Acetato de Celulose	CA	184 – 230	1936 a 229 °C	0,25 a 229 °C
	Acetato – Butirato de Celulose	CAB	200 - 240	2040 a 220 °C	0,17 a 220 °C
	Poliamida (Náilon)	PA	235 - 300	1900 a 270 °C	0,49 a 280 °C
	Polietileno Tereftalato	PET	265 - 290	1660 a 240 °C	0,29 a 240 °C
	Cloreto de Polivinila	PVC	175 – 200	1794 a 200 °C	0,198 a 203 °C
	Polimetilmetacrilato	PMMA	220 - 280	2352 a 240 °C	0,205 a 260 °C
	Poliestireno	PS	180 – 210	1770 a 235 °C	0,16 a 235 °C
	Acrilonitrila – Butadieno Estireno	ABS	220 - 270	2400 a 240 °C	0,18 a 240 °C
	Acrilonitrila - Estireno	SAN	220 – 240	2124 a 220 °C	0,16 a 244 °C
	Polipropileno	PP	200 – 280	2830 a 254 °C	0,19 a 215 °C
	Polycarbonato	PC	280 - 320	1760 a 300 °C	0,19 a 300 °C
	Polioximetileno (Acetal)	POM	180 - 235	1833 a 233 °C	0,45 a 200 °C
Termofixos	Epóxi	EMC	50 - 80	1100 a 65 °C	0,67 a 65 °C
	Uréia – Formaldeído (Uréia)	U.F	90 - 140	1670 a 120 °C	0,35 a 120 °C
	Policloropreno	CR	70 - 100	1602 a 85 °C	0,34 a 85 °C
	Poliéster (com Fibras de Vidro)	BMC	80 - 100	1070 a 100 °C	0,726 a 81 °C

Fonte: Autodesk (2014).

2.2 PROCESSO DE INJEÇÃO

Para Manrich (2005), a injeção não é um processo contínuo, mas sim intermitente, seguindo um ciclo conhecido como "ciclo de injeção". Esse ciclo pode possuir eventos que se interceptam e eventos que só ocorrem após terminar o antecedente. Segundo Harada (2004), o ciclo básico de injeção começa quando o molde fecha e dura até o próximo ciclo iniciar, e se a máquinas não tem a retirada de peças automática, o tempo que o operador leva para retirar a peça da máquina é levado em consideração.

O processo inicia quando o polímero é alimentado na injetora através de um funil de alimentação. A rosca carrega o polímero do funil para a parte frontal desta, girando e atuando como um parafuso sem fim. Enquanto a rosca gira, ela se locomove para trás, pois precisa criar espaço à sua frente para depositar o polímero que ela mesma homogeneizou e fundiu. Portanto, a rosca deposita uma quantidade de polímero para ser injetado em sua parte dianteira. Essa massa fundida não entra no molde ainda, pois o bico de injeção está normalmente fechado por uma válvula durante esse tempo (MANRICH, 2005).

Assim que a rosca homogeneíza a quantidade necessária de polímero, ela age como se fosse um pistão, fazendo movimento para frente, injetando propriamente a massa fundida para dentro do molde. Para isso, a válvula do bico de injeção se abre através de um dispositivo adequado. Por outro lado, para que o polímero não volte para trás, pelos canais da própria rosca, uma outra válvula existente na ponta desta se fecha. Devido à rosca atuar ora como parafuso sem-fim, ora como pistão é que recebe o nome de rosca recíproca. (MANRICH, 2005).

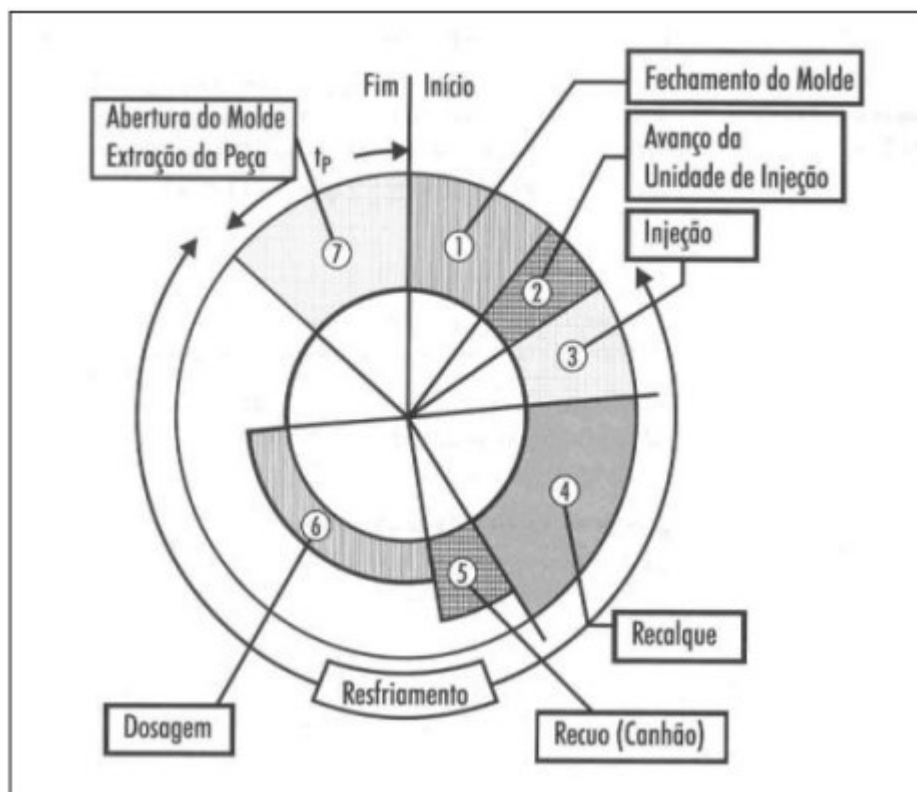
A rosca, após terminar de injetar o material para dentro do molde, tem um tempo chamado de tempo de empacotamento, onde ela continua a exercer pressão sobre o injetado (MANRICH, 2005).

Terminado o tempo de empacotamento, como também é conhecido, a rosca volta para o estágio inicial, isto é, gira e volta para a direção do funil, produzindo a próxima dosagem. (MANRICH, 2005).

O processo de resfriamento do material inicia assim que o polímero entra através dos canais do molde. Esse processo é o mais demorado do ciclo. O resfriamento se inicia em paralelo com a injeção do material e vai até a abertura do molde para a extração da peça, como representado na Figura 1. (MANRICH, 2005).

Após a pressão de recalque não ser mais necessária, o molde ainda continua fechado para terminar o processo de resfriamento. Assim que o moldado estiver na temperatura desejada, o molde se abre, ejetando a peça. Em seguida, ele é fechado novamente, voltando ao ponto inicial. (MANRICH, 2005).

Figura 1 - Ciclo básico do processo de injeção.



Fonte: Telles (2007, p 29).

O ciclo de injeção é composto pela somatória dos tempos de injeção, resfriamento, abertura e fechamento do molde.

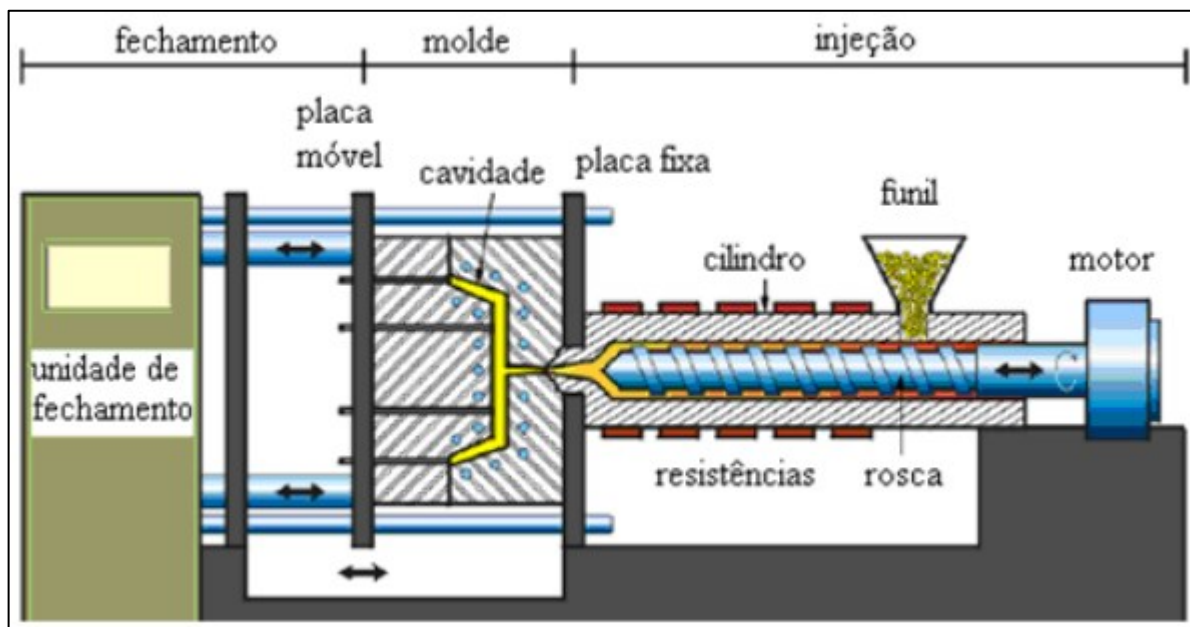
Como citado anteriormente, o resfriamento da peça é a parte do ciclo mais longa. De acordo com Harada (2004) o ideal é obter ciclos de injeção mais curtos para diminuir os custos de produção e aumentar a produtividade.

Porém para diminuir o tempo de ciclo não basta apenas diminuir o tempo de resfriamento da peça, pois se esse for muito curto pode prejudicar a sua qualidade final. Utiliza-se geralmente alterar parâmetros, como baixar a temperatura do fluido de refrigeração, sempre tendo o cuidado para que a peça não fique tensionada, quebradiça ou fosca.

2.3 MÁQUINA INJETORA

De acordo com Harada (2004), para que o polímero chegue até a cavidade do molde ele precisa ser transportado até lá, esse processo é realizado por uma máquina, que possui três unidades principais, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Máquina injetora.



Fonte: Leães (2008, p. 6).

As três unidades principais da máquina injetora, são:

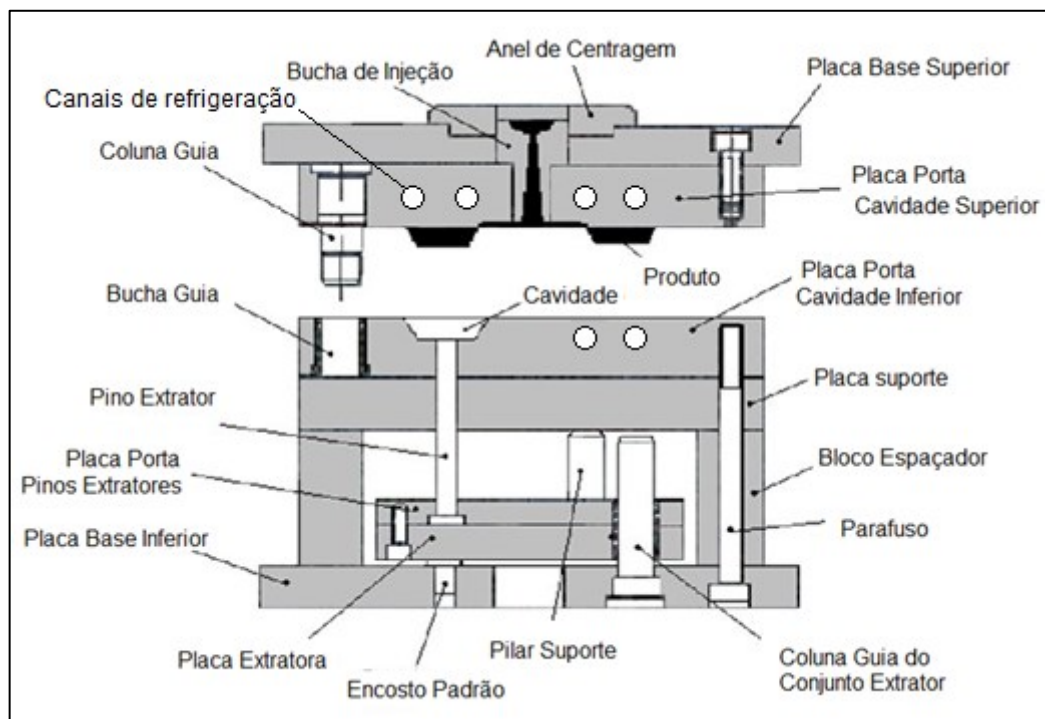
- Unidade de fechamento: Abrange todo o seu sistema de acionamento responsável por fechar o molde.
- Unidade de injeção: Engloba todo o conjunto injetor, zona de alimentação, canhão, o sistema de acionamento do conjunto.
- Molde: É a parte principal do processo de injeção, onde contém as placas porta cavidade, canais de refrigeração, entre outros componentes que serão citados a seguir.

2.4 MOLDES DE INJEÇÃO

O molde de injeção, representado na Figura 3, contém as placas porta cavidades onde o material polimérico fundido injetado assume uma forma determinada, sendo composto também das seguintes partes: placa suporte, placa base superior e inferior, conjunto extrator, bucha de injeção, anel de centragem, placas cavidade, entre outras.

O material é injetado a partir do conjunto de injeção mostrado anteriormente na Figura 2, passando pela bucha de injeção, podendo formar os canais de alimentação frios quando entra no molde até chegar nas cavidades.

Figura 3 – Estrutura esquemática de um molde de injeção.



Fonte: Reinert e Santana (2014, p. 12).

O tipo de molde mais simples é o molde de duas placas, que é constituído por uma parte fixa, ou seja, uma placa suporte e uma placa cavidade, geralmente fêmea, e por uma parte móvel constituída pela outra placa cavidade ou também chamada por Manrich (2013) de placa das buchas, por uma placa de reforço das buchas, por calços e uma placa suporte de extração.

Nas placas cavidades são usinadas as cavidades que formarão o produto. Quando o molde se fecha as placas cavidades se encaixam e deixam um espaço vazio para o polímero fundido preencher e formar o produto (MANRICH, 2013).

2.4.1 Material do Porta Cavidade e Insertos

2.4.1.1 Aço AISI H13

O processo de injeção de polímeros normalmente é realizado com matrizes de aço ferramenta para trabalho a quente. Nesses processos de fabricação, é

fundamental que o aço ferramenta possua elevadas propriedades de resistência mecânicas em altas temperaturas, a fim de se evitar falhas por fadiga térmica, deformação plástica, propagação de trincas e desgaste que são influenciados pelos tratamentos térmicos (GABARDO, 2008).

Aços para trabalho a quente (*hot working*), geralmente são aços de média e alta liga, com baixos teores de carbono. As principais propriedades requeridas são resistência à deformação em temperaturas elevadas e no tratamento térmico, resistência a trincas a quente e ao impacto e boa usinabilidade. Os tipos mais usuais dessa série são H11, H12 e H13 e encontram aplicações principalmente na fabricação de moldes para fundição sob pressão de alumínio e polímeros, ferramentas para extrusão a quente, matrizes de forjamento entre outras (GABARDO, 2008).

Esses aços constituem a família H e são ligados principalmente ao cromo, com adições de molibdênio e vanádio em quantidades menores. Formam um grupo especial de aços de alta liga, destinados a fabricação de metais em altas temperaturas, normalmente acima de 500 °C. O mais utilizado dessa família é o AISI H13, numa faixa ampla de dureza, entre 44 – 50 HRC, devendo ser especificada para as condições de aplicação da ferramenta. (GABARDO, 2008).

Devido a sua composição química, as principais características apresentadas pelo aço AISI H13 são: elevada temperabilidade, elevada resistência ao amolecimento pelo calor, boa resistência ao desgaste em temperaturas elevadas, excelente tenacidade, boa usinabilidade entre os aços-ferramenta, excelente resistência a choques térmicos devidos aos aquecimentos e resfriamentos contínuos, fazendo com que o surgimento de trincas térmicas seja reduzido, sua condutividade térmica é de 24 W/mk a 20°C e 28,3w/mk a 350°C. (UDDEHOLM, 1993 apud GABARDO, 2008, p.18).

Segundo Lucchini (2005) apud Gabardo 2008) o aço ferramenta AISI H13 tem a seguinte composição química (Tabela 1): (p. 18).

Tabela 1 - Composição química do aço ferramenta AISI H13.

Elemento	Composição (%)
<i>Carbono (C)</i>	0,32 - 0,45
<i>Cromo (Cr)</i>	4,75 - 5,50
<i>Silício (Si)</i>	0,8 - 1,2
<i>Molibdênio (Mo)</i>	1,10 - 1,75
<i>Manganês (Mn)</i>	0,20 - 0,50
<i>Vanádio (V)</i>	0,8 - 1,2

Fonte: Adaptado de Lucchini (2005) apud Gabardo (2008, p. 18).

2.4.1.2 Cobre

O cobre (Cu) é um dos poucos metais que ocorrem na natureza em seu estado puro. Segundo Canata Junior (2012), o cobre foi o primeiro metal usado pelo homem. Acredita-se que por volta de 13.000 a.C. foi encontrado na superfície da Terra em forma de "cobre nativo", o metal puro em seu estado metálico.

Em diversos lugares do mundo já foram encontrados objetos de cobre muito antigos, isso prova as propriedades únicas do metal: durabilidade, resistência à corrosão, maleabilidade, ductilidade e fácil manejo (CANATA JUNIOR, 2012).

O elemento não é magnético e pode ser utilizado puro ou em ligas com outros metais que lhe conferem excelentes propriedades químicas e físicas. O Quadro 2, apresenta algumas características.

Quadro 2- Características do cobre puro.

Propriedades básicas	
<i>Densidade (g/cm³)</i>	8,9
<i>Calor específico (J/kg°C)</i>	380
<i>Condutividade térmica (W/m°C)</i>	380
<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	117
<i>Coeficiente de dilatação térmica linear (1/°C)</i>	17,6 x 10 ⁻⁶
<i>Coeficiente de Poisson</i>	0,33

Fonte: Autodesk (2014).

Canata Junior (2012) afirma que o cobre proporciona uma maior capacidade de conduzir corrente elétrica para um mesmo diâmetro de fio ou cabo do que qualquer outro metal de engenharia usualmente empregado como condutor elétrico. Além disso, o cobre também proporciona uma condutividade térmica superior (60% superior ao alumínio), o que leva a uma economia de energia e facilita a dissipação de calor.

2.4.1.3 Aço Carbono

Segundo Chiaverini (2008, p. 22), é uma liga de ferro (Fe) e carbono (C), contendo entre 0,008 a 2,1% de carbono, além de outros elementos residuais, como o manganês, o silício, o fósforo e o enxofre, participam igualmente do ajuste do nível de resistência do aço.

Adicionando maiores quantidades de carbono, os resultados desta mistura, torna as ligas mais quebradiças. Existem quatro categorias de aço carbono, que são distinguíveis pela quantidade de carbono adicionado à mistura de liga metálica. As utilizações de aço carbono dependem desta classificação.

Aços-Liga são os aços que contém um ou mais elementos de liga além do Fe e C, em quantidades tais que modifiquem ou melhorem substancialmente uma ou mais de suas propriedades quer sejam físicas, mecânicas ou químicas. Com a adição desses elementos, de forma isolada ou combinada em porcentagens variáveis, fabrica-se uma enorme variedade de aços-liga, cada qual com suas características e aplicações.

Para trabalhos a quente, são utilizados os aços de média liga, que possuem em sua composição de 5% a 10% de elementos de liga, além do Fe e C. São aplicados em situações que envolvem elevada resistência mecânica em temperaturas elevadas (TECNOLOGIA... 2001).

No quadro 3 são apresentadas algumas características do aço carbono escolhido.

Quadro 3 - Características do aço carbono.

<i>Propriedades básicas</i>	
<i>Densidade (g/cm³)</i>	7,8
<i>Calor específico (J/kg°C)</i>	460
<i>Condutividade térmica (W/m°C)</i>	41
<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	200
<i>Coeficiente de dilatação térmica linear (1/°C)</i>	11,3 x 10 ⁻⁶
<i>Coeficiente de Poisson</i>	0,29

Fonte: Autodesk (2014).

2.4.1.4 Ligas Ampcoloy

Resinas ou compostos são desenvolvidos conforme necessidade e aplicação, e devido ao sucesso alcançado dão margem para novas pesquisas. Na fabricação dos moldes, a busca por qualidade, redução de custo e a diminuição do ciclo de moldagem sugere a troca da matéria-prima de fabricação, com inclusão de metais não ferrosos que contribuem com uma melhora já comprovada na refrigeração, acelerando o processo de resfriamento do produto.

Ligas de Cobre + Berílio (CuBe) são utilizadas devido à capacidade de obter boas propriedades físicas e mecânicas, quando comparadas aos aços normalmente utilizados para a construção de moldes. Diversas ligas CuBe podem ser nitretadas aumentando ainda mais sua dureza superficial, resultando com baixas perdas de condutividade térmica. (CASTAGNA, 2014)

O Ampcoloy® 83 é uma liga de cobre com 2% de Berílio com propriedades mecânicas muito elevadas juntamente com boa condutividade elétrica e térmica. É aplicado aonde se deseja uma boa resistência ao desgaste ou elevadas propriedades mecânicas, e ao mesmo tempo boa condutividade elétrica e térmica. Na indústria do plástico, o Ampcoloy® 83 é, muitas vezes, utilizado nos moldes como placas e insertos refrigerantes, como fundo ou gargalo nos moldes soprados de garrafas plásticas. (LIGAS... 2018).

A liga Ampcoloy® 940 é uma liga utilizada onde é exigido boa condutividade térmica, juntamente com elevadas propriedades mecânicas. Sua composição nominal

é formada por 2,5% de Níquel, 0,7% de Silício, 0,4% de Cromo e o restante Cobre. Essa liga, também, apresenta alta resistência a corrosão, pois tanto o cobre como o níquel são dois elementos que apresentam essa característica. (LIGAS... 2018).

O Ampcoloy® 972 é uma liga de cobre endurecido por precipitação. Uma vez tratada termicamente, esta liga mantém as propriedades mecânicas juntamente com uma boa ductilidade na faixa de temperatura de 300 a 500°C. Os atributos desta liga versátil incluem alta condutividade elétrica e altas propriedades mecânicas. É composta por 1% de Cromo, 0,1% de Zircônio, 0,5% de outros elementos e o restante de Cobre. (LIGAS... 2018). O Quadro 4 apresenta algumas características das ligas Ampcoloy®.

Quadro 4 - Características das ligas Ampcoloy®.

Propriedades básicas	Ampcoloy® 83	Ampcoloy® 940	Ampcoloy® 972
<i>Densidade (g/cm³)</i>	8,26	8,71	8,9
<i>Calor específico (J/kg°C)</i>	420	380	380
<i>Condutividade térmica (W/m°C)</i>	106	208	320
<i>Módulo de elasticidade (GPa)</i>	131	131	120
<i>Coeficiente de dilatação térmica linear (1/°C)</i>	1,75 x 10 ⁻⁶	17,5 x 10 ⁻⁶	17 x 10 ⁻⁶
<i>Coeficiente de Poisson</i>	0,3	0,31	0,31

Fonte: Autodesk (2014).

O ANEXO A apresenta um gráfico comparando a Condutividade Térmica versus Dureza, entre algumas ligas Ampcoloy® e outros aços - ferramenta, usualmente utilizados na indústria de termoformagem.

2.5 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Quando há uma diferença de temperatura entre regiões, ou quando dois corpos a diferentes temperaturas são colocados em contato, ocorre uma transferência de energia. Esse processo é denominado transmissão de calor (ARAÚJO, 1978).

Quando um material permite facilmente a transferência de energia por diferença de temperatura, este é chamado de condutor térmico, e quando um material

dificulta essa transmissão, chamamos o mesmo de isolante térmico (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

A transferência de energia em forma de calor se dá através de três modos distintos: condução, radiação e convecção. Sendo a condução e a convecção os meios mais influentes na transferência de calor em moldes de injeção.

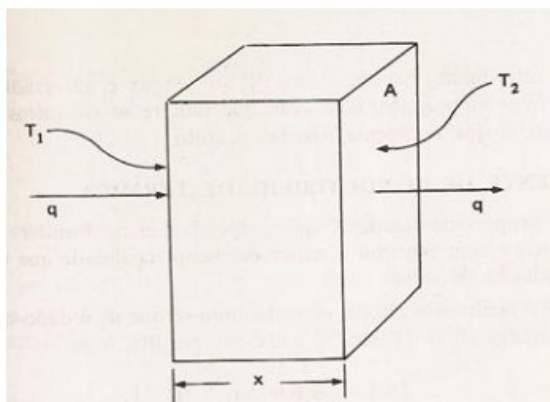
2.5.1 Condução

Neste processo a transmissão de energia térmica se dá de uma região de temperatura mais elevada para uma região de menor temperatura, devido à interação entre as moléculas. Como os átomos da região mais quente possuem em média uma energia cinética maior do que a energia cinética dos átomos da região mais fria, ocorrem colisões entre eles e parte da energia é transferida em forma de calor, sem apresentar deslocamento de massa (YOUNG; FREEDMAN, 2008).

Fourier analisou o fluxo de calor que atravessava uma parede de seção reta constante, com todas as faces isoladas termicamente, exceto duas paralelas e opostas (ARAÚJO, 1978).

Assim sendo, assegurou-se que o fluxo a ser medido experimentalmente se daria apenas em uma dimensão. Portanto, verificou que o fluxo de calor era diretamente proporcional à área e à diferença de temperatura entre as faces paralelas e opostas, sendo suas temperaturas mantidas constantes e inversamente proporcional à espessura da parede. A Figura 4 mostra o sentido do fluxo de calor, descrito pela Equação (1), as dimensões da parede e a temperatura de cada face desta parede.

Figura 4 - Esquema de transferência de calor através de uma parede.



Fonte: Araújo (1978).

Portanto:

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = \frac{A \Delta T}{x} \quad (1)$$

Onde

$(\Delta Q/\Delta t)$ é a potência térmica transferida por condução;

A é a área da seção reta da parede;

ΔT é a variação de temperatura das faces opostas da parede;

x é a espessura da parede.

Observando o fenômeno com outros materiais e mantendo A , ΔT e x constantes, Fourier averiguou que o fluxo de calor mudava em cada material. Com essa observação ele introduziu um coeficiente característico de cada material representado por k e denominado coeficiente de condutividade térmica. Esse fator de proporcionalidade indica se um material apresenta maior ou menor facilidade de conduzir calor. Com isso a Equação (1) passou a ter a seguinte notação, mostrada na Equação (2):

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = k \frac{A \Delta T}{x} \quad (2)$$

A Equação (2) é restrita a configuração geométrica em que a área, normal ao fluxo de calor, é constante. Para uma disposição em que a área não é constante, Fourier fez uso de uma área elementar dA , com espessura dx e temperatura dT . Dessa forma, a Equação (2) assumiu uma nova ordenação, como mostra a Equação (3):

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = -k dA \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

O sinal negativo introduzido nesta equação é referente ao fato de que o gradiente dT/dx é decrescente, ou seja, o fluxo de calor é positivo (ARAÚJO, 1978).

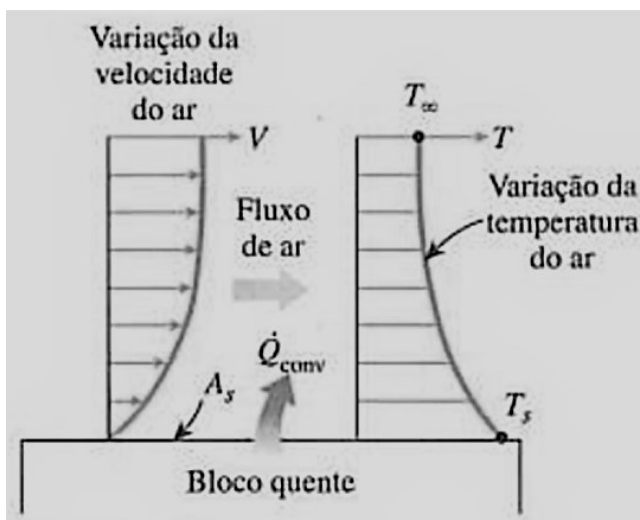
2.5.2 Convecção

O processo onde a energia em forma de calor é transmitida devido ao movimento de massa entre regiões do fluido é conhecida como convecção.

Em uma superfície que esteja a uma temperatura acima da temperatura do fluido envolvente, a transmissão de energia em forma de calor se dará, primeiramente por condução, da superfície para as partículas do fluido próximas à mesma. Após estas partículas se deslocarão até uma região de menor temperatura (correntes de convecção), devido a forças de empuxo ocasionadas por diferença de densidade (se tratando de um mesmo material, as partículas mais quentes são menos densas que partículas menos quentes) ou por um agente externo, transferindo parte de sua energia para outras partículas do fluido. Esse fenômeno também é válido em situações onde essas partículas do fluido cedem energia em forma de calor. (KREITH, 1977).

Quando uma superfície sólida troca energia em forma de calor com um fluido, há combinação de condução e transporte de massa. Estando a superfície sólida mais aquecida que o fluido haverá troca de energia em forma de calor entre o sólido e as partículas fluidas (Figura 5). A energia adquirida por estas partículas neste processo causará uma movimentação no interior do mesmo. (KREITH, 1977).

Figura 5 - Transferência de calor, de uma superfície quente para o ar, por convecção.



Fonte: Çengel (2009, p. 26).

A convecção pode ser forçada, quando é utilizado algum sistema que utiliza trabalho para induzir o movimento do fluido pelo sólido, ventiladores ou bombas, por exemplo, ou pode ser livre, quando a movimentação do fluido é induzida de meio natural, por exemplo, variação de densidade (ÇENGEL, 2009).

A energia em forma de calor transferida por convecção, por unidade de tempo, entre uma superfície e um fluido, pode ser calculada através da relação proposta por Isaac Newton (Equação (4)), conhecida como lei de resfriamento de Newton.

$$H = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta t} \right) = hA\Delta T \quad (4)$$

Onde

(H) é a potência térmica transferida por convecção, em W;

(h) é o coeficiente de convecção, em W/m² °C;

(A) é a área da superfície, em m²;

(ΔT) é a diferença de temperatura entre a superfície e o fluido, em °C.

A velocidade do fluxo de ar influencia na troca de calor do fluido com a superfície. O coeficiente *h* é determinado experimentalmente, segundo Çengel (2009), para convecção de gases forçada o coeficiente varia entre 25 e 250 W/m² °C e para convecção forçada de líquidos varia numa faixa de 50 a 20000 W/m² °C, sendo este último o caso de refrigeração em moldes de injeção.

2.6 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

A refrigeração no ciclo de injeção é a etapa em que o material fundido troca calor com as paredes do molde, para atingir a temperatura de extração, temperatura na qual a peça já tem rigidez suficiente para ser extraída do molde sem sofrer danos estruturais ou superficiais (HARADA e UEKI, 2012).

O tempo de refrigeração no ciclo de injeção é dito como um tempo morto por Harada e Ueki (2012), pois o molde só deve ficar mantido fechado sob pressão. Essa etapa do ciclo de injeção é a mais longa e a que mais afeta a produtividade da máquina, mas se o tempo de refrigeração for muito curto pode causar empenamento, problemas na extração e danos na superfície do produto.

O sistema de refrigeração tem como principal função o controle da temperatura do molde. Portanto a diferença de temperatura entre as superfícies da cavidade do molde deve encontrar-se entre 2°C e 5°C. Nesses parâmetros, a refrigeração do molde torna-se eficiente, possibilitando a redução ou eliminação de possíveis tensões residuais termo induzidas, provenientes do resfriamento desbalanceado. (MENGES, 1993 apud SILVA, 2011, p. 38)

É nesta etapa que é controlado o acabamento superficial da peça, grau de cristalinidade e tensão residual. Segundo Harada e Ueki (2012), a variação de temperatura entre a massa fundida e as paredes do molde, a condutividade térmica do polímero, a condutividade térmica do metal do molde, a temperatura do fluido, sua condutividade térmica, velocidade de circulação e a limpeza dos canais de circulação, são fatores que afetam a eficiência da troca térmica.

Há possibilidade de ocorrência de temperaturas desiguais entre as placas do molde (REES, 1995 apud SILVA 2011, p. 38). Essa diferença pode criar deformações nos produtos em função de uma placa quente em relação à placa fria. Essa diferença de temperatura entre as placas fixadas uma à outra, também gera consideráveis forças nas próprias placas, no sistema de alinhamento, nas guias do molde e nos extratores, que geram desalinhamento na estrutura do molde, necessitando assim, um método mais eficiente de alinhamento.

No resfriamento dos polímeros semicristalinos são formados os cristalitos, cadeias macromoleculares que se organizam perto uma das outras, e são eles que determinam algumas propriedades do produto, como a densidade, dureza, resistência

à tração, rigidez, impermeabilidade, contração, entre outras. Quando o resfriamento é lento o tempo para ordenação das cadeias é maior e consequentemente o grau de cristalinidade também (HARADA e UEKI, 2012).

Em resfriamentos lentos decorrente de maior espessura das seções do produto, ou das altas temperaturas necessárias, o grau de cristalinidade aumenta causando maior contração volumétrica e relaxação das tensões induzidas (HARADA e UEKI, 2012).

Segundo Harada e Ueki (2012), é difícil obter características homogêneas em toda a peça por causa de diferentes pressões ao longo da cavidade do molde, diferenças de temperatura ao longo do molde devido as diferentes distâncias entre a superfície da peça e os canais de refrigeração, e espessuras desiguais do moldado. Geralmente a peça injetada fica com diferentes graus de cristalinidade ao longo da superfície, formando um gradiente de densidade.

2.6.1 Tipos de sistema de refrigeração

A arquitetura do sistema de refrigeração é dependente do perfil da cavidade do molde, podendo assumir várias formas diferentes, sendo os principais, canal obtido por furação, *Bubbler* e *Baffles* (CENTIMFE, 2003 apud BERNER, 2016).

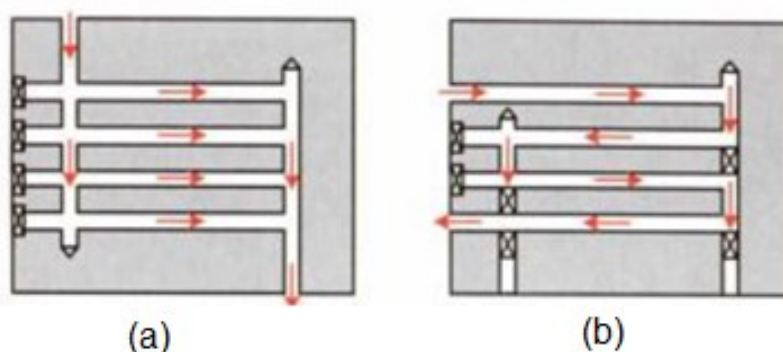
Para algumas aplicações pode ser necessário o uso de resistências elétricas para algum aquecimento específico, ou de gases, mas em geral o sistema de refrigeração trabalha com líquidos como água ou óleo para a troca de calor. Os sistemas por furação são feitos em um circuito fechado em que o fluido refrigerante entra por uma entrada que se localiza ao lado da saída do mesmo. Dependendo da altura da cavidade o circuito pode ter um único nível ou mais (CENTIMFE, 2003 apud BERNER, 2016, p. 27).

As configurações mais comuns para os canais de refrigeração são em paralelo (a) e em série (b), como mostra a Figura 6. No canal em série, o fluido deve percorrer um caminho único do começo ao fim do circuito, tendo em vista que entra por um furo e sai por outro e tem velocidade e vazão constante ao longo do canal.

O fluido se divide no caso do canal em paralelo, diminuindo assim a velocidade e vazão nos canais laterais e retorna à velocidade inicial quando o fluido volta para o canal de saída do circuito.

Os dois tipos de canais podem ser construídos com as mesmas furações, utiliza-se somente tampas em lugares diferentes para que seja controlado o caminho na qual o fluxo de fluido percorre.

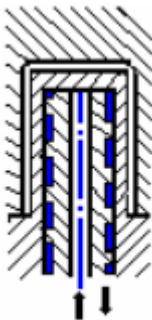
Figura 6 - Circuito de refrigeração (a) em paralelo e (b) em série.



Fonte: Centinfe apud Berner (2016, p.45).

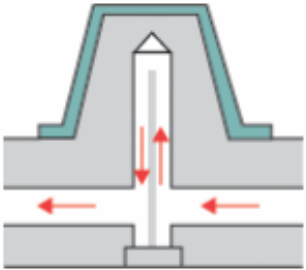
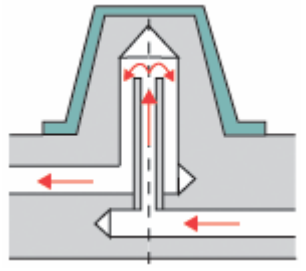
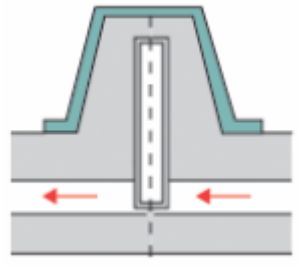
No Quadro 5 são apresentados diversos modelos de sistema de refrigeração, estes podem ser combinados para aumentar a eficiência do resfriamento, dependendo da complexidade da cavidade do molde.

Quadro 5 - Modelos de sistema de refrigeração.

Tipo	Característica
 <p>Cascata com canal helicoidal</p>	<p>Este tipo de circuito pode ser utilizado para qualquer formato de peça, não tendo de ser necessariamente circular. Para isto basta que o postigo a ser utilizado seja fabricado com o circuito e os canais conforme o controle de temperatura específico, para melhor acompanhar a peça.</p>

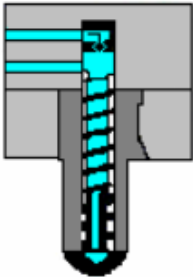
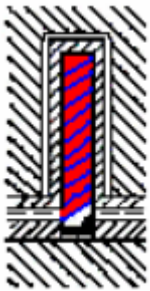
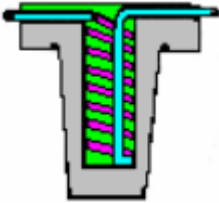
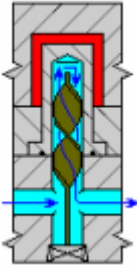
Fonte: Brito *et al* (2003); Menges e Mohren (1993); Provenza, (1993).

Quadro 5- Modelos de sistema de refrigeração (Continuação).

Tipo	Característica
 <p>Cascata com palheta ou <i>Baffle</i></p>	<p>Este tipo de circuito pode ser usado para refrigerar zonas do molde onde falta espaço para criar-se um canal de retorno. Pode ser utilizado também em cavidades profundas.</p>
 <p>Cascata com núcleo ou <i>Bubbler</i></p>	<p>Semelhante ao de cascata com palheta, porém o diâmetro do furo onde a água deverá passar terá de ser maior. Deve-se tomar o cuidado no momento de projetar para evitar a formação de bolsas de ar na base da câmara.</p>
 <p>Pino térmico</p>	<p>É utilizado em dimensões menores que o da cascata com palheta. A eficiência do pino térmico é muito mais elevada se comparado a água. Mas a desvantagem é que sua altura não pode ser ajustada (não pode ser cortado), e $\frac{1}{4}$ de seu comprimento deve estar banhado em água.</p>

Fonte: Brito *et al* (2003); Menges; Mohren (1993); Provenza, 1993.

Quadro 5- Modelos de sistema de refrigeração. (Continuação).

Tipo	Característica
 <p>Cascata com núcleo helicoidal simples</p>	<p>São componentes normalizados que variam de diâmetros entre 12 a 50 mm, sendo amplamente utilizados em peças cilíndricas. Neste caso o fluido refrigerante entra pelo centro e desce em espiral.</p>
 <p>Cascata com núcleo helicoidal duplo</p>	<p>Semelhante a cascata com núcleo helicoidal simples. Porém aqui o fluido refrigerante sobe em espiral e desce em espiral.</p>
 <p>Tubos de cobre (Serpentina)</p>	<p>O espaço entre os tubos de cobre e a cavidade deve ser preenchido com material de baixo ponto de fusão para melhorar a transferência de calor. Sua utilização não é recomendável, pois ocupa muito espaço.</p>
 <p>Cascata com palheta helicoidal</p>	<p>Semelhante ao de cascata com palheta. Porém devido à alta turbulência induzida torna-se mais eficiente.</p>

Fonte: Brito *et al* (2003); Menges; Mohren (1993); Provenza, 1993.

Muitas são as configurações de sistemas de refrigeração conhecidas para aplicação em moldes de injeção para termoplásticos (APÊNDICE A). Entretanto, cada uma tem sua aplicação específica que, se bem utilizada, torna a empresa mais competitiva em função da redução do tempo de ciclo e da melhoria da qualidade dos produtos.

Os canais são desenvolvidos de acordo com o perfil da cavidade e podem ser obtidos através do princípio de prototipagem rápida. As cavidades e os machos podem ser obtidos empregando-se processos tais como: aplicação de resinas não-metálicas na zona de moldagem (moldes-híbridos) ou de deposição de metais. O emprego de resinas não metálicas na zona de moldagem possui propriedades térmicas desfavoráveis, fato que tende a aumentar o ciclo de moldagem da peça injetada (LIMA et al, 2004 apud SILVA, 2011, p. 38).

2.6.2 Simulação de injeção

Segundo Manrich (2013), os materiais termoplásticos devem ser caracterizados da forma mais ampla possível para que os programas de computador possam gerar projetos confiáveis. Bancos de dados que detalham os valores das propriedades dos polímeros são utilizados com os programas. Os usuários de programas recebem bancos de dados cujo conteúdo foi originado, na sua maioria, por fornecedores de matéria – prima.

Os bancos de dados servem para várias análises do processo de injeção, dentre elas de preenchimento das cavidades do molde, do resfriamento, do empacotamento e empenamento. A simulação de projetos requer dados de propriedades de fluxo e propriedades térmicas, como viscosidade, densidade, condutividade térmica, temperatura de amolecimento, temperatura de distorção térmica, calor específico, entre outros. Além destes, dados opcionais que podem ampliar a confiabilidade da simulação e completar a análise de fatores como empacotamento e empenamento são: pressão de empacotamento; temperatura do molde; módulo volumétrico, coeficiente de expansão térmica; curvas PvT (pressão – volume – temperatura); módulo elástico; módulo de cisalhamento viscoelástico e índice de fluidez. (MANRICH, 2013).

A simulação de injeção de termoplásticos pode auxiliar desde a concepção do produto, no desenvolvimento e/ou manutenção do molde em geral, até a otimização do ciclo de moldagem da peça. Isso minimiza erros de projetos tanto do produto quanto do molde, e ainda barateia os custos de desenvolvimento de novos produtos. (HARADA e UEKI, 2012).

Harada e Ueki (2012) ainda destacam os benefícios obtidos pelo uso desses *softwares* como ferramenta de simulação do processo de moldagem:

- Melhoria das propriedades do material injetado;
- Otimização da localização das entradas de injeção;
- Balanceamento de moldes múltiplas cavidades e moldes do tipo família;
- Redução do tempo de ciclo de injeção;
- Otimização do perfil de injeção (velocidade/pressão);
- Localização e controle de linhas de emenda;
- Visualização e solução de problemas de empenamento;
- Determinação da localização de saída de gases;
- Determinação de tensões residuais no processo de injeção;
- Otimização de circuitos de refrigeração;
- Redução do tempo de desenvolvimento do molde;
- Redução do número de *try-out* para liberar o molde;
- Eliminação de retalhos no ferramental.

As etapas de recalque e resfriamento são muito importantes pois podem comprometer as dimensões e formas da peça propostas pelo projeto. A contração ou redução do tamanho da peça, ocorre devido ao efeito de resfriamento e à evolução de sua cristalinidade quando o material é semicristalino. O empenamento resulta de uma contração não uniforme, oriundo destes processos. (HARADA e UEKI, 2012)

3 METODOLOGIA

Berner (2016), realizou um estudo onde analisou a configuração de canal de refrigeração apresenta maior eficiência no resfriamento de determinada peça, a qual a Universidade Federal de Santa Catarina, possui o molde para sua produção.

Esse trabalho deu sequência ao estudo de Berner (2016), utilizando a mesma geometria e a configuração de canal de refrigeração que, segundo Berner (2016), apresentou menor tempo de resfriamento para a peça. A partir disso, foi criada uma alternativa de sistema de resfriamento mais eficiente.

Para a realização deste trabalho foi utilizada a simulação computacional, com o *software* CAE, *Moldflow® Synergy 2014*, que trabalha com elementos finitos criando uma malha para efetuar os cálculos. Esse *software* dá a possibilidade de criação de três tipos de malhas diferentes, a *Midplane*, a *Dual Domain* e a *3D solid*. Cada malha tem tipos de elementos diferentes. A malha utilizada foi do tipo *Dual Domain*, que cria a malha de análise na superfície do objeto estudado.

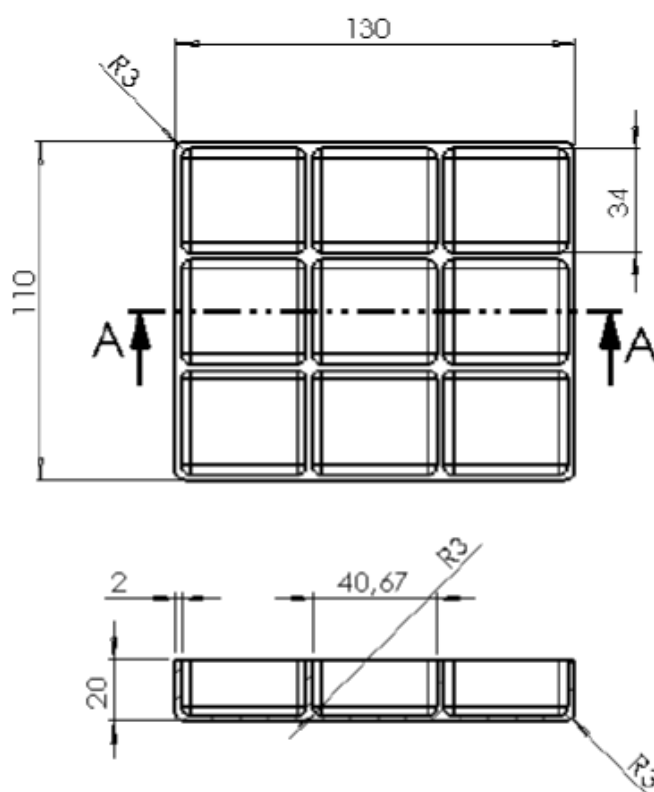
Nas simulações em *software* CAE foram empregadas a sequência de análise de preenchimento, resfriamento, preenchimento, empacotamento e empenamento (*Fill+Cool+Fill+Pack+Warp*), com o objetivo de obter resultados de resfriamento. As placas inserto foram criadas no sistema computacional *Computer Aided Design* (CAD) 3d e importadas ao *software* de simulação no formato *Initial Graphics Exchange Specification* (IGES), que é um formato de arquivo neutro do fornecedor que permite a troca digital de informações entre sistemas CAD então foi criada a malha sobre as placas e alterado seu tipo para *mold insert surface*, posteriormente os tipos de materiais dos insertos também foram alterados. O molde foi criado automaticamente em torno da peça após indicadas as dimensões em cada eixo.

Para verificar se o sistema proposto oferece melhorias, os resultados foram comparados com o tempo de ciclo de um processo com circuito de refrigeração padrão de aço H13. Os resultados foram comparados e será analisado a influência do material do inserto na dissipação de calor em moldes de injeção.

3.1 GEOMETRIA

A peça que foi usada nas simulações foi uma geometria de caixa (Figura 7), com nove compartimentos, tem 130 mm de largura, 110 mm de altura, 20 mm de profundidade e 2 mm de espessura, sendo cada compartimento com 18 mm de profundidade. A peça conta também com filetes de 3 mm para evitar cantos.

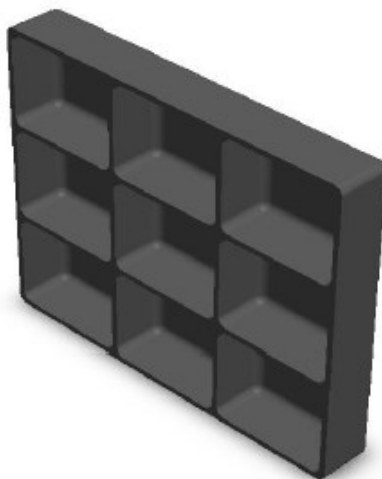
Figura 7 – Dimensões da peça.



Fonte: Berner (2016, p. 41).

A Figura 8 apresenta a peça desenhada em um programa CAD. Para importar ao *Moldflow*® foi utilizado o formato IGES. A malha de elementos finitos dessa peça apresentou 2989 nós, 5974 elementos triangulares e média de *aspect ratio* de 7.

Figura 8 - Geometria a ser simulada.

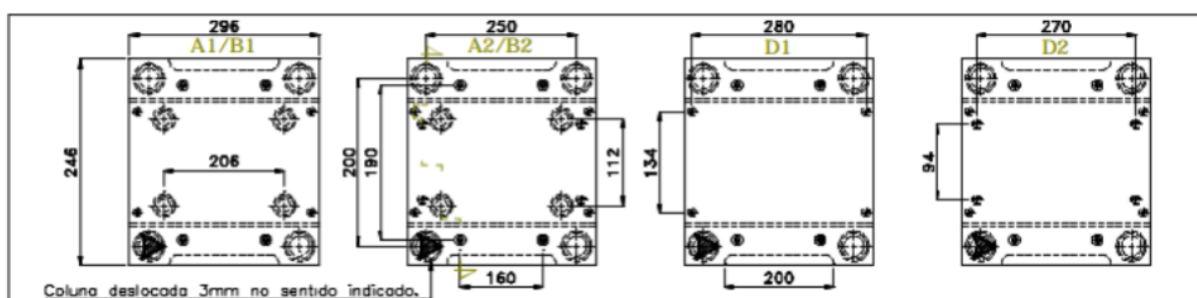


Fonte: Berner (2016, p. 40).

3.2 PORTA - MOLDE

Para realizar as simulações foi utilizado um modelo de porta molde da marca MDL (Figura 9), suas medidas são de 246 mm x 296 mm x 325 mm, as placas cavidade são de 60 mm de espessura e possuem área útil de 174 mm x 154 mm.

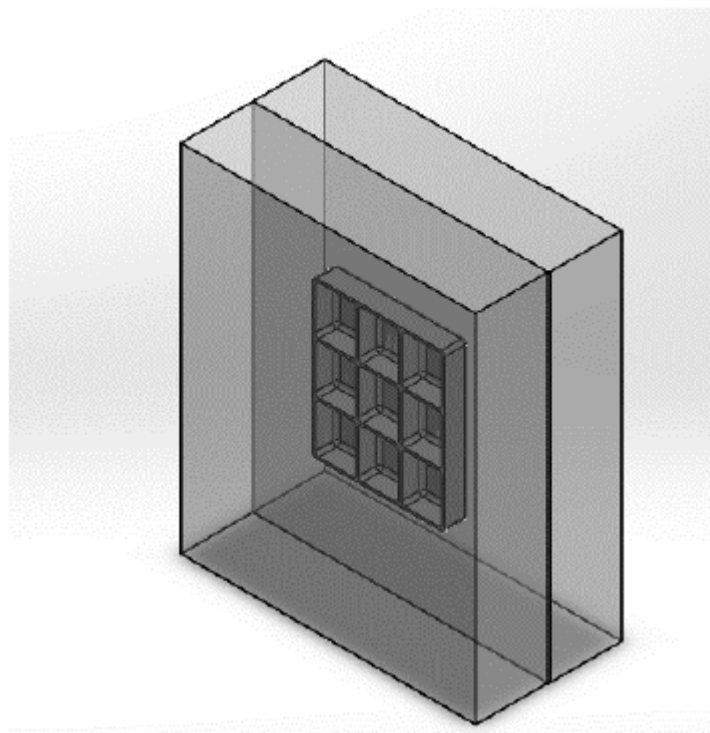
Figura 9 - dimensões do porta molde utilizado como modelo.



Fonte: MDL (2016).

A Figura 10 mostra como a peça fica disposta dentro do molde. Dos 20 mm de profundidade da peça, 2 mm estão na placa fixa e 18 mm na placa móvel. Dessa forma, dos 60 mm da placa fixa menos os 2 mm ocupados pela cavidade da peça sobram 58 mm para o canal de injeção.

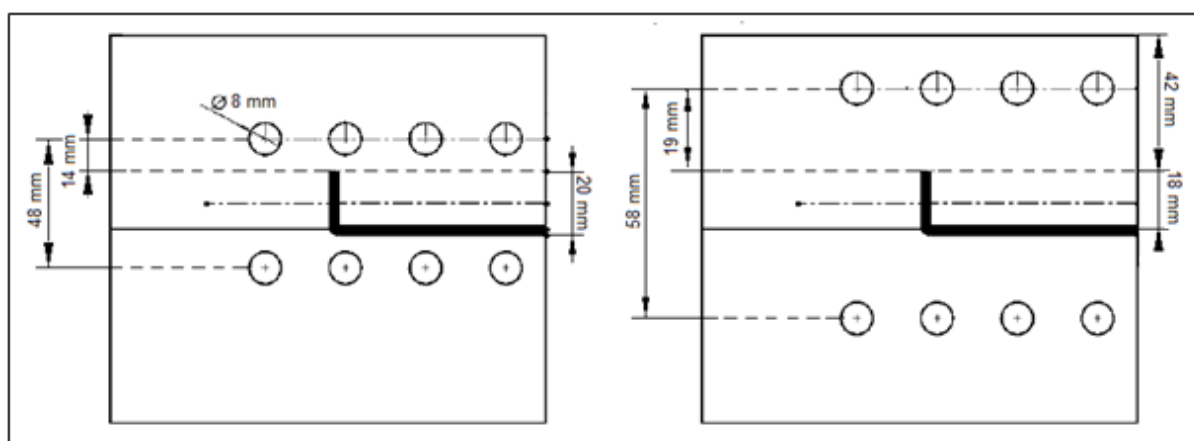
Figura 10 – Criação do molde



Fonte: Berner (2016, p. 42).

Para FERREIRA (2004) o diâmetro dos canais deve ser de 6 a 18 mm. Este mesmo autor sugere que a distribuição dos canais de refrigeração deve obedecer a relação apresentada na Figura 11 onde, a distância do centro dos canais até a superfície da cavidade deve estar no mínimo a 0,8 vezes o diâmetro dos canais e no máximo 2,5 vezes o diâmetro dos canais.

Figura 11 – Distribuição dos canais de refrigeração.



Fonte: Adaptado de Berner (2016, p. 43).

Seguindo a sugestão de FERREIRA (2004), citada anteriormente, para 8 mm de diâmetro dos canais de refrigeração, temos que $0,8 \times 8 \text{ mm} = 6,4 \text{ mm}$, entre o centro

do canal e a superfície da cavidade e a distância máxima será, $2,5 \times 8 = 20$ mm. Como as placas das cavidades tem 60 mm de espessura, para os casos simulados, devido a utilização dos insertos, foi utilizado como distância mínima 14 mm e máxima 19 mm entre o centro dos canais e a superfície da cavidade.

3.3 MATERIAIS POLIMÉRICOS PARA INJEÇÃO

Os materiais utilizados foram:

- 1 - Polipropileno (PP) JY 6100 da SHELL;
- 2 - Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) Terluran GP-22 da BASF;
- 3 - Poliamidas (PA) Reny W38 da Mitsubishi Engineering-Plastics Corporation;
- 4 - Poliéster (PET) Hyperite 5251 da Kaneka;
- 5 – Poliestireno (PS) Polystyrol 186 N da BASF.

Os materiais foram escolhidos pelo fato de apresentarem propriedades distintas, descritas no Quadro 6.

Quadro 6 - Propriedade dos materiais utilizados nas simulações.

Característica	ABS	PP	PET	PA	PS
<i>Estrutura</i>	Amorfo	Cristalina	Cristalina	Cristalina	Amorfo
<i>Nome do produto</i>	BASF Terluran GP22	SHELL JY 6100	KANEKA Hyperite 5251	mitsubishi Reny W38	BASF Polystyrol 168 N
<i>Calor específico (J/kg. °C)</i>	2447 a 250°C	2830 a 254°C	1460 a 297°C	2650 a 260°C	1975 a 230°C
<i>Taxa de cisalhamento (1/s)</i>	50000	24000	50000	100000	40000
<i>Tensão de cisalhamento (MPa)</i>	0,3	0,26	0,5	0,31	0,25
<i>Densidade (g/cm³)</i>	1,04	0,92	1, 5	1,07	1,05
<i>Temperatura de ejeção (°C)</i>	93	93	204	133	96
<i>Condutividade térmica (W/m°C)</i>	0,16 a 220°C	0,19 a 215°C	0,30 a 250°C	0,49 a 280°C	0,15 a 230°C
<i>Temperatura de fusão (°C)</i>	De 220 a 270	De 200 a 280	De 260 a 310	De 253 a 300	De 180 a 260
<i>Temperatura do molde (°C)</i>	50	50	95	90	40

Fonte: Autodesk (2014).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de entrada, para a análise no *software*, são eles: temperatura de ejeção, injeção e do molde, além do tempo de abertura e fechamento do molde e a porcentagem de material que atingiu a temperatura de ejeção.

Tabela 2 - Condições iniciais da simulação.

Condições de análise	ABS	PP	PET	PA	PS
<i>Temperatura de Ejeção (°C)</i>	93	93	150	133	96
<i>Temperatura de Injeção (°C)</i>	230	230	270	265	230
<i>Temperatura do molde (°C)</i>	40	40	100	90	40
<i>tempo de abertura/fechamento do molde (s)</i>	5	5	5	5	5
<i>Porcentagem que atingiu a temperatura de ejeção (%)</i>	95	95	95	95	95
<i>Temperatura do fluido de refrigeração (°C)</i>	25	25	25	25	25

Fonte: Autor (2017).

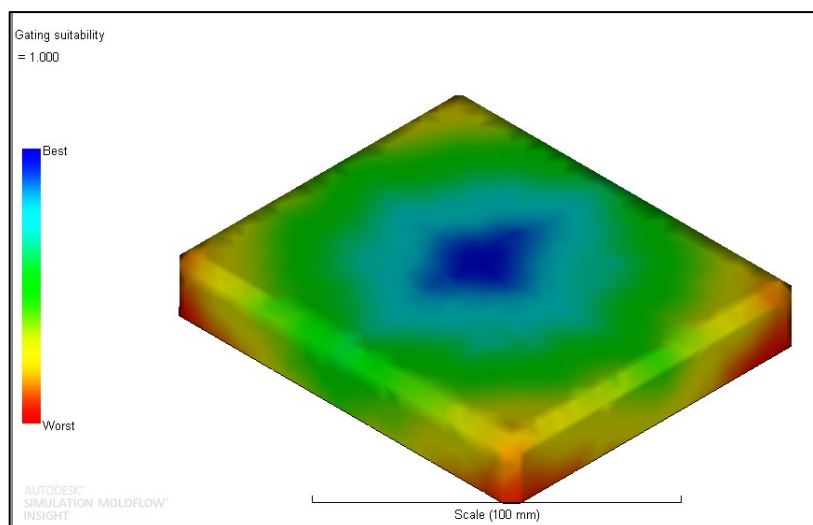
As condições foram padronizadas para o ABS e PP, que possuem características de injeção semelhantes. Para o PS, PET e o PA a temperatura de injeção, ejeção e temperatura do molde, foram mantidas as condições sugeridas pelo *software* de simulação.

3.3.1 Ponto de injeção do material

O melhor local para o ponto de injeção é no centro da peça como mostra a simulação da Figura 12. Sua localização determina o padrão de preenchimento, comprimento máximo da frente de fluxo de material e orientação das moléculas do polímero, além de determinar o ponto onde existirá a marca do ponto de injeção, sempre existente em qualquer peça moldada pelo processo de injeção de termoplásticos.

Segundo Dias (2008) em condições ideais, o ponto de injeção de material deve ser posicionado no centro da peça, de maneira a obter-se as menores distâncias entre este e as extremidades da peça moldada, ou em intervalos regulares (para casos de moldes com múltiplos pontos de injeção), sempre considerando que o fluxo deve partir das paredes mais espessas para as mais finas, evitando, assim, que a frente de fluxo congele precocemente, impedindo o completo preenchimento da cavidade.

Figura 12 - Escolha da posição do ponto de injeção.

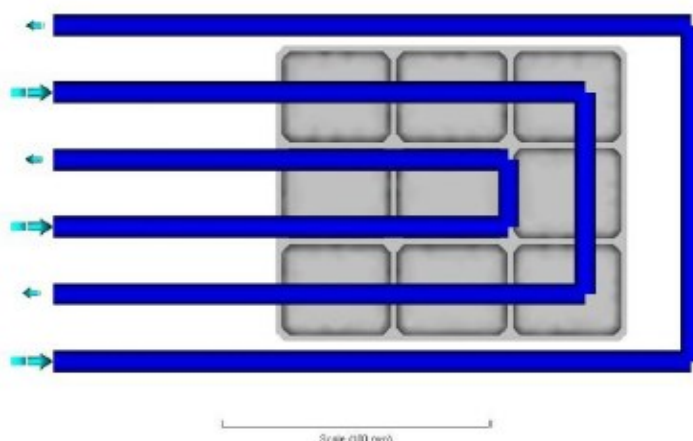


Fonte: Autor (2018).

3.4 TIPO DE CANAL DE REFRIGERAÇÃO

O sistema utilizado possui três canais em série em formato de “U”, concêntricos um ao outro, com entrada e saída de fluido pelo mesmo lado do molde, como mostra a Figura 13, que segundo Berner (2016) mostra-se mais eficiente. O circuito em série com seis canais, distância de 25 mm entre canais, altura de 14 mm para a primeira simulação e 19 mm para a segunda, em relação a superfície da peça e diâmetro de 8 mm, foi escolhido como o melhor por apresentar menor tempo de ciclo.

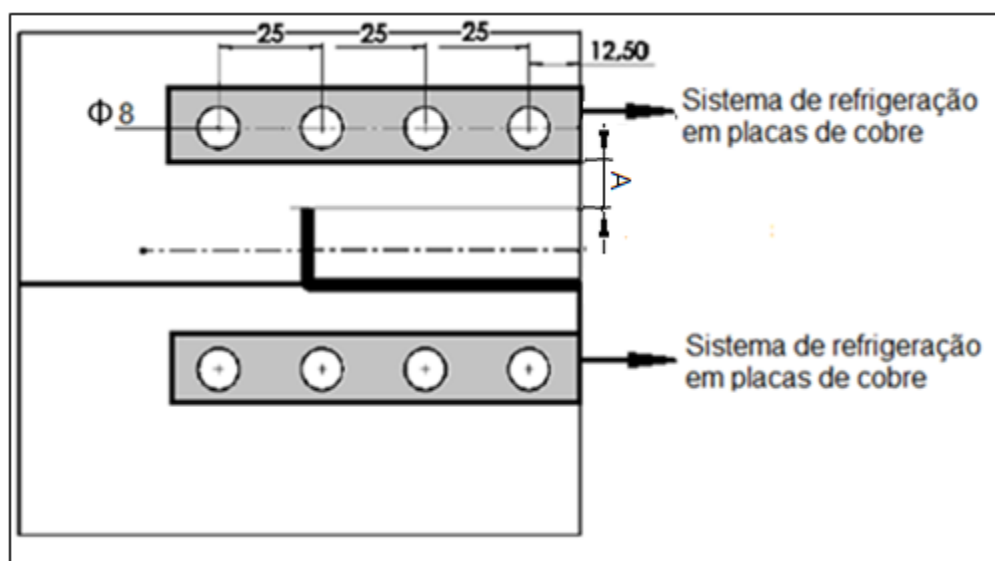
Figura 13 - Sistema de refrigeração escolhido.



Fonte: Berner (2016, p. 56).

A partir desse modelo de canal, foi criado um sistema com canais usinados em placas que foram acopladas ao molde como na Figura 14.

Figura 14 - Representação do sistema de refrigeração em placas.



Fonte: Adaptado de Berner (2016, p. 43).

As placas representadas na Figura 14 foram criadas em CAD 3d separadamente e importadas ao *Moldflow*®, foram realizadas comparações entre o sistema com os insertos e o sistema padrão em aço H 13. Para o sistema com insertos a distância “A” assumiu 5 mm no caso onde a distância entre o centro dos canais de refrigeração e a superfície da peça foi 14 mm e assumiu 10 mm quando a distância entre o centro dos canais de refrigeração e a superfície da peça foi 19 mm.

3.5 ESCOAMENTO DO FLUIDO REFRIGERANTE

O escoamento do fluido dentro dos canais de refrigeração pode assumir duas formas, escoamento laminar e escoamento turbulento.

O escoamento laminar ocorre quando as partículas de um fluido se movem ao longo de trajetórias bem definidas, apresentando lâminas ou camadas (daí o nome laminar) cada uma delas preservando sua característica no meio. No escoamento laminar a viscosidade age no fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência. Este escoamento ocorre geralmente a baixas velocidades e em fluídos que apresentem grande viscosidade.

Quando as partículas de um fluido não se movem ao longo de trajetórias bem definidas, ou seja, as partículas descrevem trajetórias irregulares, com movimento aleatório, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões de massa líquida, o escoamento é dito como turbulento. Este escoamento é comum na água, cuja a viscosidade é relativamente baixa.

O Quadro 7 apresenta a faixa de valores para os regimes de escoamento.

Quadro 7 - Regimes de escoamento conforme o número de *Reynolds*.

Número de Reynolds (<i>Re</i>)	Tipo de escoamento
$4000 < Re$	Escoamento Turbulento
$2300 < Re < 4000$	Escoamento de Transição
$100 < Re < 2300$	Escoamento Laminar
$Re < 100$	Escoamento Estagnado

Fonte: Adaptado de Çengel (2007, p. 280).

Para a simulação é interessante variar o número de *Reynolds* para analisar a influência do regime de escoamento do fluído para o resfriamento da peça.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos e dados coletados.

4.1 ESCOLHA DO NÚMERO DE REYNOLDS

Após ter definido o local adequado para o ponto de injeção, foi realizado uma sequência de simulações para determinar qual o número de *Reynolds* mais adequado para melhorar a eficiência da refrigeração da peça. As simulações consideraram escoamento laminar e turbulento, para o modelo convencional, os valores utilizados para *Reynolds* foram 500, 1500, 3000, 5000, 6500, 8000, 10000, 12000, 15000, a avaliação do tempo de ciclo é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Variação do número de Reynolds para injeção dos materiais selecionados.

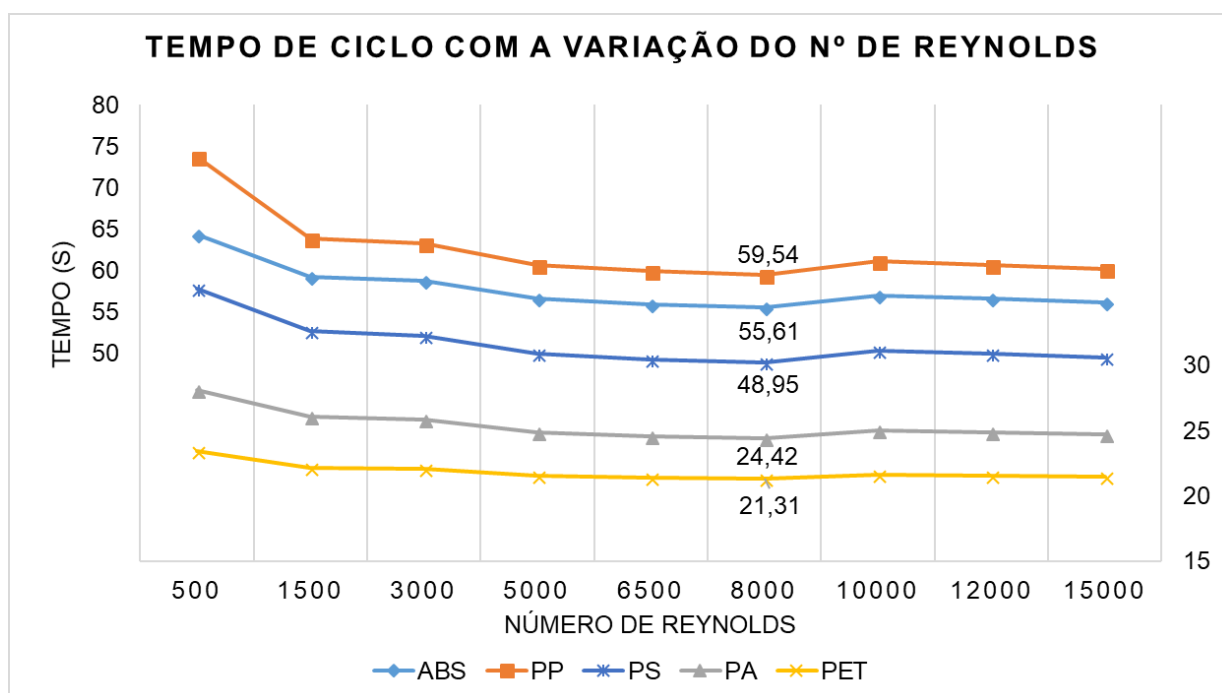
Número de <i>Reynolds</i> (Re)	<i>Tempo de ciclo</i> (s)				
	ABS	PP	PET	PA	PS
500	64,4	73,75	28,1	23,47	57,86
1500	59,3	63,85	26,09	22,17	52,7
3000	58,79	63,28	25,86	22,06	52,17
5000	56,61	60,72	24,86	21,54	49,97
6500	55,97	59,97	24,58	21,4	49,32
8000	55,61	59,54	24,42	21,31	48,95
10000	57	61,17	25	21,64	50,36
12000	56,61	60,72	24,87	21,55	49,97
15000	56,15	60,19	24,69	21,45	49,5

Fonte: Autor (2018).

A variação do número de *Reynolds* evidencia a influência que tipo de escoamento tem sobre a eficiência do resfriamento da peça. Percebe – se que para escoamento laminar o tempo de ciclo é maior e diminui conforme torna – se turbulento.

Transformando os dados da Tabela 3 no Gráfico 1, fica mais claro observar que o tempo de ciclo é menor para $Re = 8000$.

Gráfico 1 - Análise do tempo de ciclo com a variação do número de Reynolds.

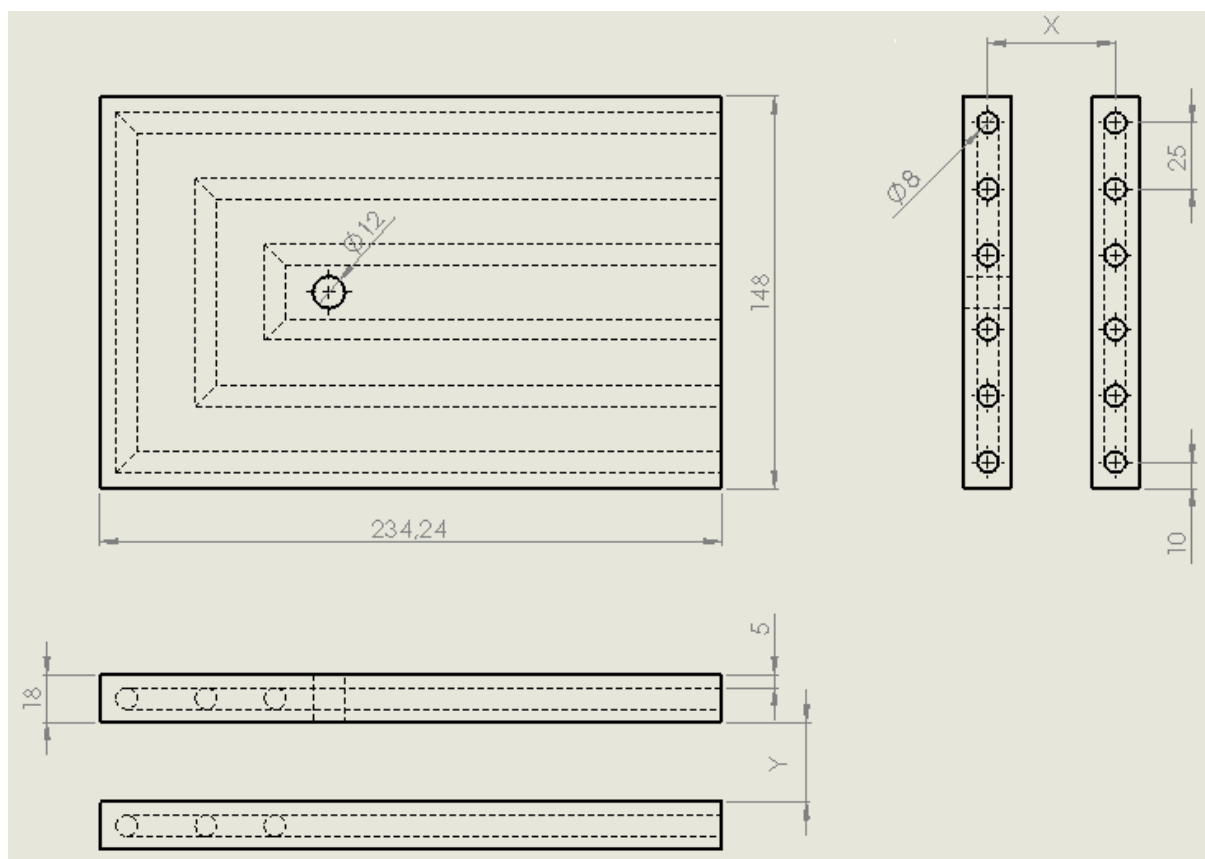


Fonte: Autor (2018).

4.2 CRIAÇÃO DAS PLACAS INSERTO PARA O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

A partir do canal de refrigeração proposto por Berner (2016) foi possível criar as placas com os canais de refrigeração em software CAD, o software utilizado foi o *Solidworks®*. O resultado pode ser visualizado na Figura 15, onde está representado o desenho técnico das placas com as 3 vistas principais. As dimensões do desenho técnico são lidas em milímetros. As medidas caracterizadas por “X” e “Y”, que representam a distância entre uma placa e outra e consequentemente a distância entre o canal de refrigeração superior e inferior da peça, serão alteradas durante as simulações para fins de comparação, receberão os valores de $X = 48 \text{ mm}$ e consequentemente $Y = 30 \text{ mm}$ para uma das simulações e $X = 58 \text{ mm}$ e $Y = 40 \text{ mm}$ para a outra simulação.

Figura 15 - Desenho técnico das placas com os canais de refrigeração.



Fonte: Autor (2018).

As placas foram salvas em formato IGES para fosse possível importá-las para o *Moldflow*®.

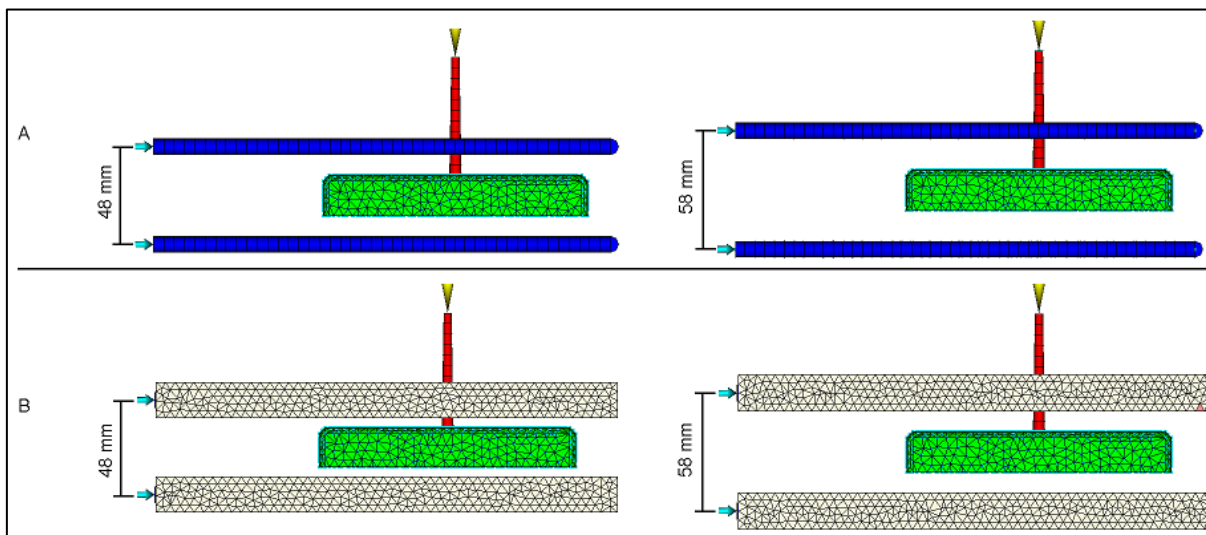
4.3 COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Como apresentado anteriormente, o objetivo das simulações foi fazer um comparativo entre um sistema de refrigeração convencional, usinado no porta cavidade do molde, e o sistema criado, usinado em placas de diferentes materiais e adicionadas ao molde como insetos.

Primeiramente foi comparado a diferença no tempo de ciclo com uma distância de 48 mm entre os canais de refrigeração da placa porta molde superior e inferior (Figura 16).

As placas foram importadas ao *Moldflow*®, selecionadas e denominadas como *Mold insert surface* (Superfície de molde inserida), em seguida receberam as propriedades dos materiais selecionado.

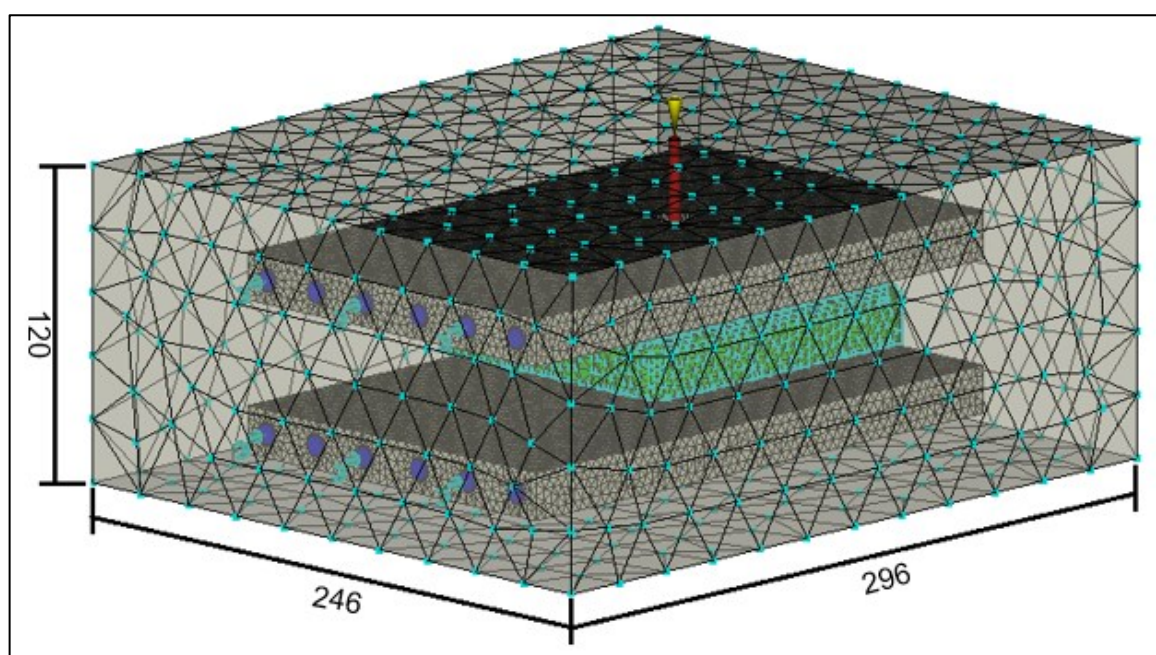
Figura 16 – Representação do sistema de refrigeração convencional (A) e com insertos (B), para as distâncias entre os canais de 48 mm e 58 mm.



Fonte: Autor (2018).

As placas porta-molde, foram criadas na sequência, através da ferramenta *Mold surface* do *Moldflow®*, em aço H13. As medidas já foram discutidas anteriormente e não são alteradas independentemente do tipo de sistema a ser simulado, as medidas estão representadas na Figura 17.

Figura 17 - Dimensões do molde porta-cavidade.



Fonte: Autor (2018).

As simulações foram realizadas inicialmente sem insertos, apenas com os moldes de aço H13, que serviu como padrão de comparação, em seguida os insertos foram adicionados. Primeiramente foi escolhido o material para representar o inserto, então suas propriedades foram atribuídas a ele. Para cada polímero foram realizadas duas simulações com cada material utilizado como placa de refrigeração, uma utilizando 48 mm de distância entre os canais de refrigeração e outra 58 mm. A Tabela 4 traz os resultados das simulações.

Tabela 4 – Resultados das simulações variando o material dos insertos.

<i>Material injetado</i>	<i>Distância entre canais</i>	<i>Tempo de Ciclo para cada material do inserto</i>					
		<i>H13</i>	<i>COBRE</i>	<i>CARB STEEL</i>	<i>AMPCO 83</i>	<i>AMPCO 940</i>	<i>AMPCO 972</i>
<i>PP</i>	48 mm	59,54	44,19	57,57	46,98	44,20	45,02
	58 mm	62,16	44,98	57,52	40,77	45,02	45,01
<i>ABS</i>	48 mm	55,60	44,26	54,37	44,36	44,29	44,30
	58 mm	57,84	43,56	52,62	42,38	43,50	44,56
<i>PA</i>	48 mm	24,40	18,08	23,76	21,77	19,59	18,35
	58 mm	25,48	18,11	24,35	21,94	19,42	18,41
<i>PET</i>	48 mm	21,31	17,99	21,01	19,94	19,12	18,30
	58 mm	21,86	18,25	21,37	20,24	19,16	18,49
<i>PS</i>	48 mm	54,9	43,35	53,25	41,44	43,39	43,39
	58 mm	57,2	42,70	52,07	41,59	42,64	43,58

Fonte: Autor (2018).

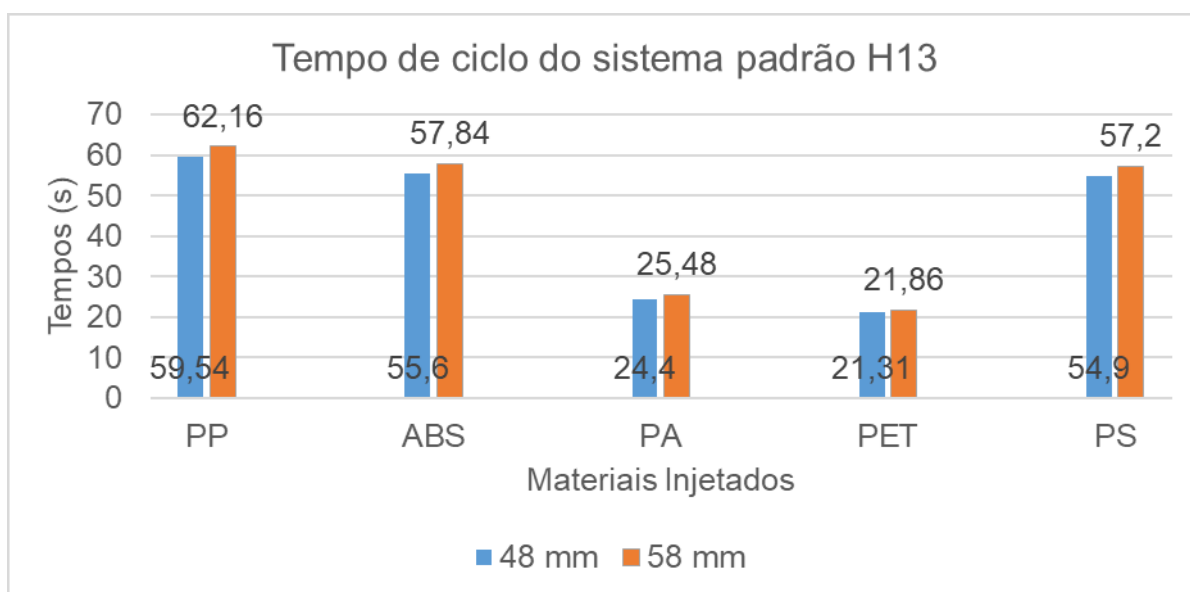
Os resultados obtidos na Tabela 4 mostram que o sistema criado traz mais eficiência no resfriamento do material injetado. Na primeira coluna do tempo de ciclo, temos o H13 como padrão de comparação, este foi simulado sem insertos. Pode – se perceber que os canais de refrigeração usinados em insertos podem diminuir o tempo de ciclo de uma peça. Essa melhora depende muito das características do material, principalmente da condutividade térmica, tanto do polímero injetado, quanto do material do molde e inserto. Nesse trabalho todos os materiais utilizados como inserto possuem sua condutividade térmica maior que a do material do molde, o aço H13.

Se observarmos as características de cada material utilizado como inserto e analisarmos a Tabela 4, vemos que para os materiais com maior condutividade térmica, o tempo de ciclo é menor. O mesmo ocorre quando o material injetado possui condutividade térmica elevada.

4.3.1 Simulação do Sistema Padrão com aço H13

A primeira simulação foi realizada com o sistema convencional, sem insertos com molde de aço H13, o qual foi o padrão de comparação para os sistemas com insertos. O Gráfico 2, mostra os resultados de tempo de ciclo para o molde convencional.

Gráfico 2 - Tempo de ciclo para os materiais poliméricos injetados no sistema padrão H13.

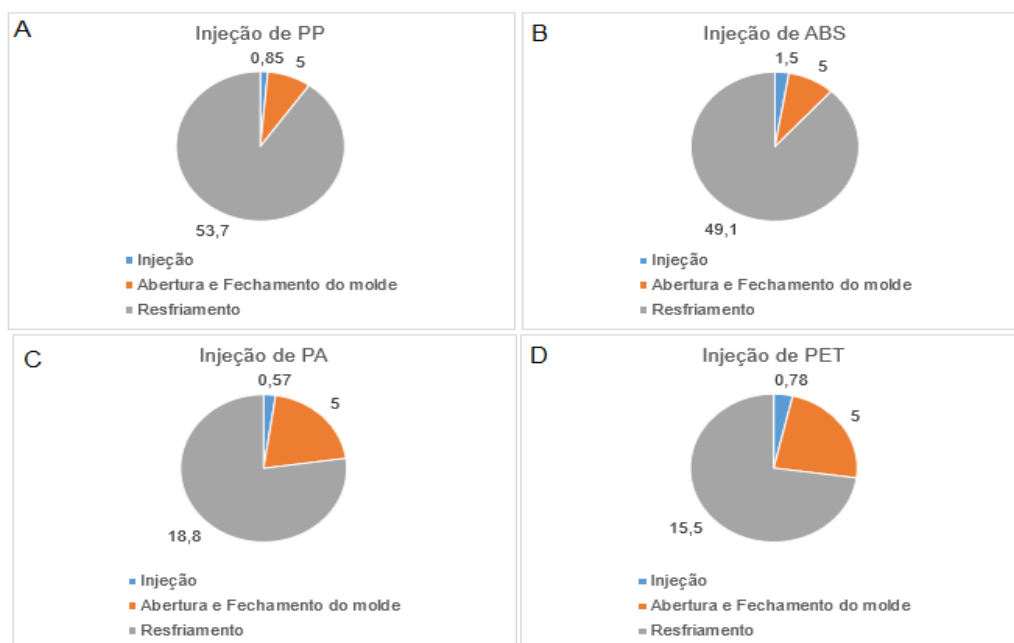


Fonte: Autor (2018).

O menor tempo de ciclo acontece para a injeção do PET, tanto para 48 mm de distância entre canais, como para 58 mm, com 21,31 segundos e 21,86 segundos, respectivamente. Na sequência o PA, que apresenta 24,4 segundos e 25,48 segundos, seguido pelo ABS, com 55,6 segundos e 57,84 segundos e por fim o PP com 59,54 segundos e 62,16 segundos. Para o sistema padrão a distância entre canais influencia no tempo, o tempo de ciclo para 48 mm é menor que o tempo para 58 mm.

O tempo de ciclo total é calculado pela soma dos processos do ciclo de injeção, como mostra o Gráfico 3 (A, B, C, D), para a injeção dos materiais selecionados com 48 mm de distância entre os canais.

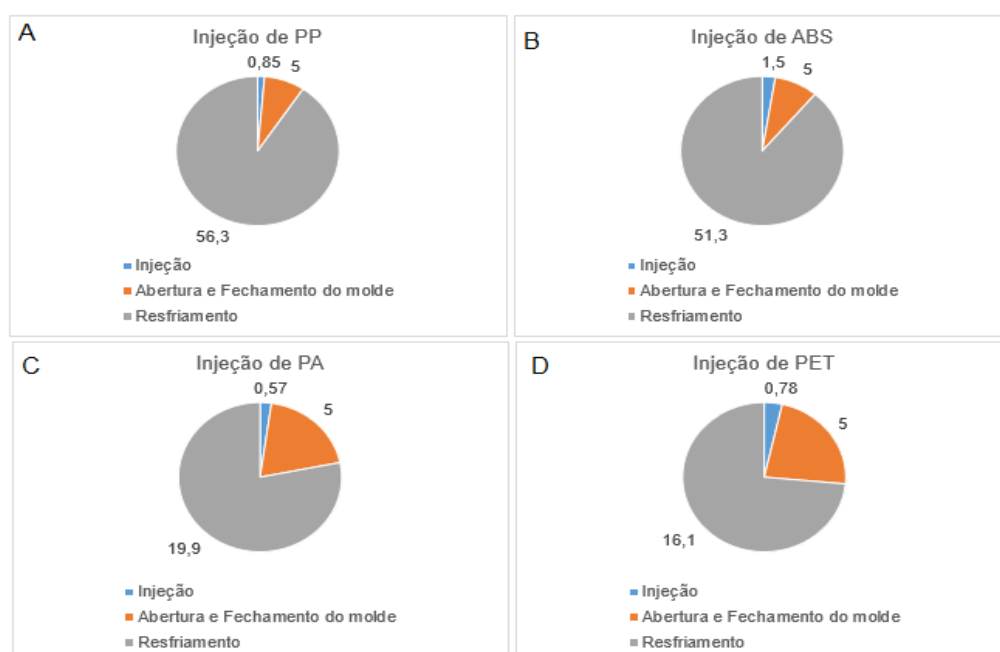
Gráfico 3 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção dos polímeros selecionados no sistema padrão H13 e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.



Fonte: Autor (2018).

Para o sistema com 58 mm entre os canais de refrigeração, os tempos que resultam no tempo de ciclo total, são apresentados no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção dos polímeros selecionados no sistema padrão H13 e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.



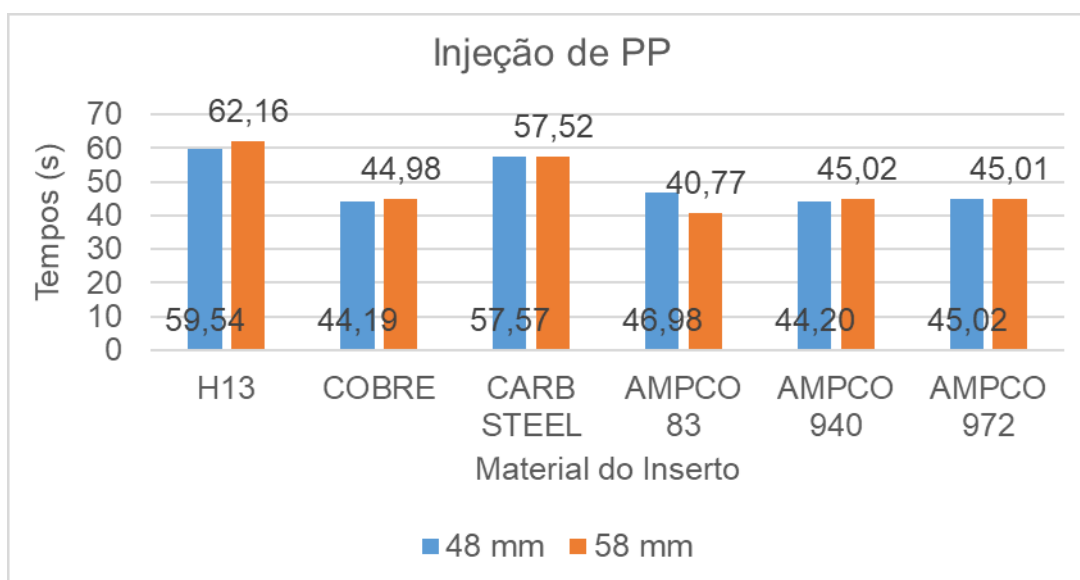
Fonte: Autor (2018).

O gráfico dos tempos que compõem o tempo de injeção para os materiais injetados, mostra claramente que no ciclo de injeção o tempo de resfriamento é o mais longo para todos os casos. O tempo de injeção varia para cada material conforme suas propriedades, o tempo de abertura e fechamento do molde é padrão para todas as simulações

4.3.2 Simulação de Injeção do PP

Na sequência, o Gráfico 5 mostra de maneira mais clara os resultados para a injeção do PP.

Gráfico 5 - Injeção de PP para cada material do inserto.



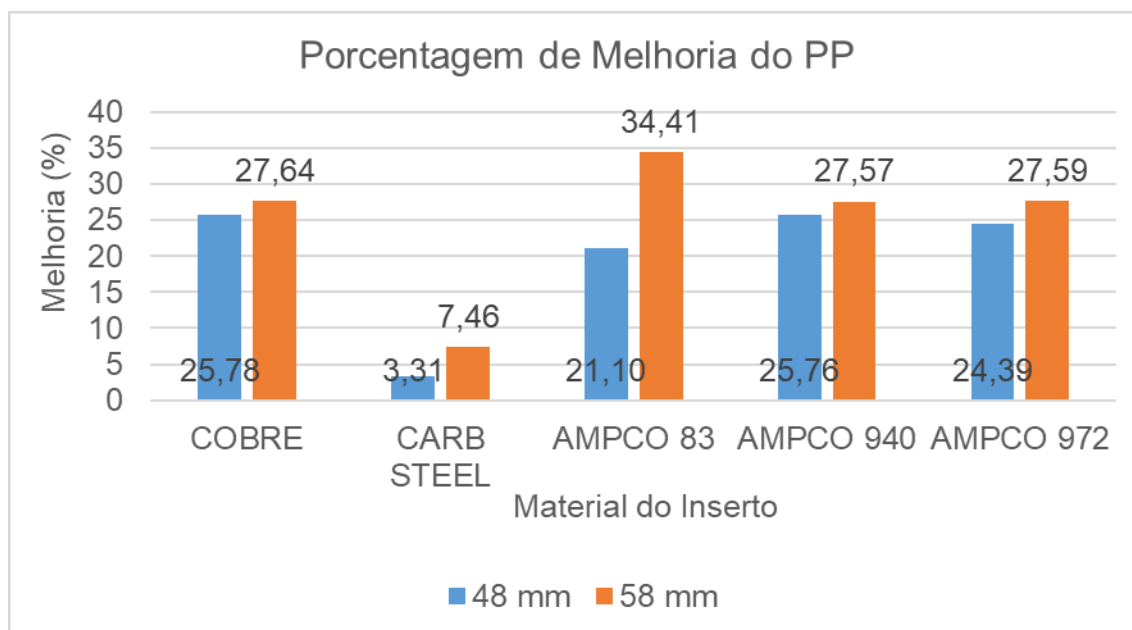
Fonte: Autor (2018).

Nesse caso o PP, que possui a condutividade térmica de $0,19 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, apresentou melhorias consideráveis. O menor tempo de ciclo em relação ao sistema padrão, ocorreu com insertos de cobre e ligas Ampcoloy® 940, com distância entre canais de 48 mm, o maior tempo de ciclo foi com o inserto de aço carbono, este possui a mais baixa condutividade térmica, $41 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, a menor entre os insertos.

Quando a distância entre canais é de 58 mm, o aço carbono continua apresentando o tempo de ciclo mais elevado, O menor tempo para essa configuração foi obtido com a liga Ampcoloy® 83.

O percentual de melhoria de cada inserto em relação ao sistema padrão com aço H13 é mostrado no Gráfico 6.

Gráfico 6 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do PP.



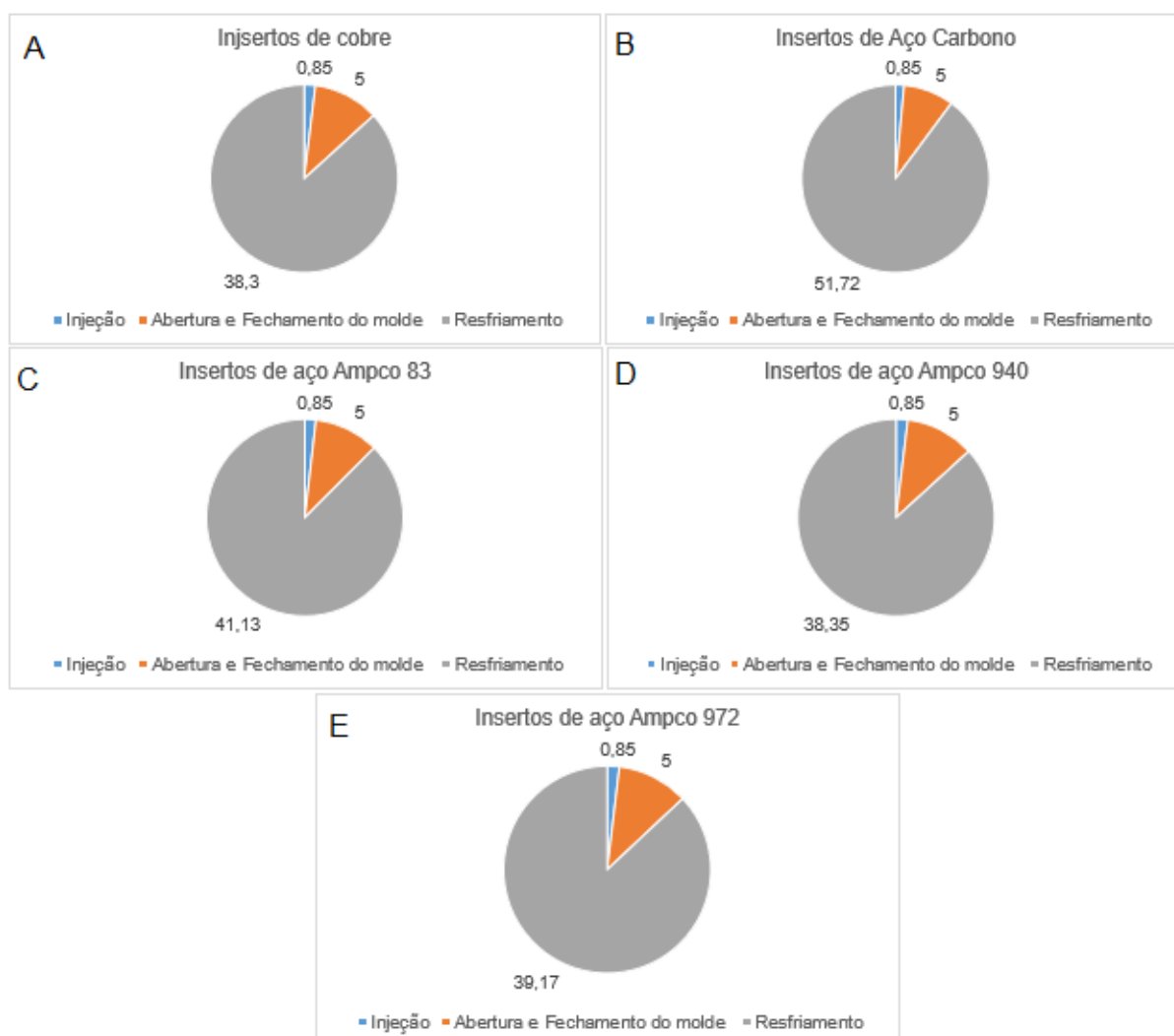
Fonte: Autor (2018).

Podemos verificar nesse gráfico que a maior porcentagem de eficiência, para 48 mm entre canais, foi atingida com os insertos de cobre e liga Ampcoloy® 940 que apresentaram melhoria de 25,7%. Já o menos eficiente, o aço carbono, reduziu apenas 3,3% do tempo de ciclo.

Das simulações, a configuração de 58 mm entre os canais, com inserto de liga Ampcoloy® 83, se destacou, diminuindo 34, 4% o tempo de ciclo em relação ao sistema padrão.

É possível visualizar no Gráfico 7 (A,B,C,D,E), como é dividido o tempo total de ciclo, para a injeção de PP e distância entre canais de 48 mm, para cada inserto utilizado.

Gráfico 7 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PP com cada inserto e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.

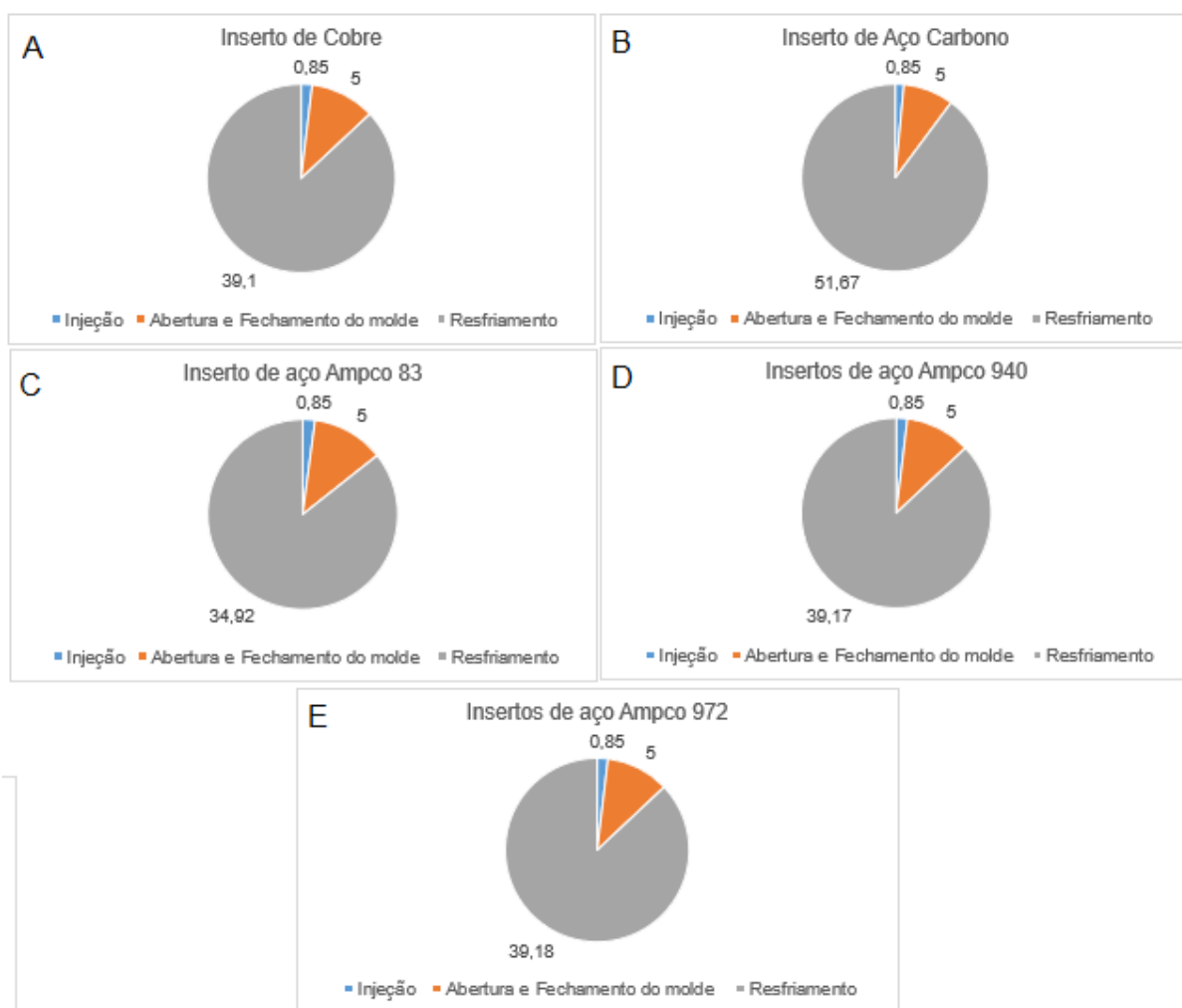


Fonte: Autor (2018).

Este gráfico, confirma que para 48 mm de distância, os insertos de cobre e liga Ampcoloy® 940 mostraram maior redução de tempo no resfriamento.

O ciclo que apresentou maior eficiência, com insertos de liga Ampcoloy® 83 com 58 mm de distância, é representado no Gráfico 8 C.

Gráfico 8 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PP com cada inserto e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.



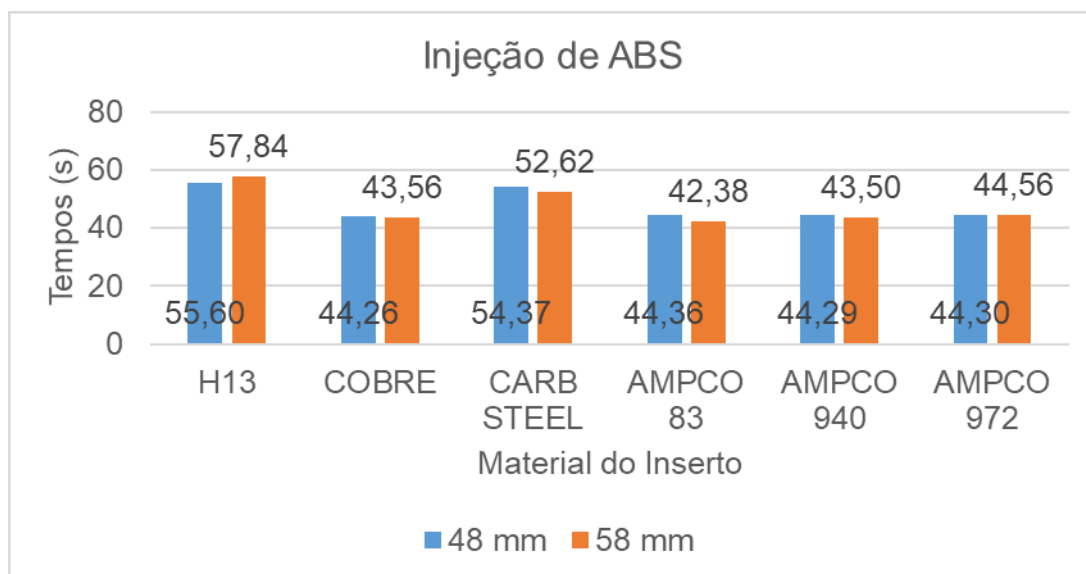
Fonte: Autor (2018).

O gráfico mostra o menor tempo de resfriamento para o sistema com insertos de liga Ampcoloy® 83, como mencionado anteriormente.

4.3.3 Simulação de Injeção do ABS

No Gráfico 9, podemos observar de maneira mais clara o comportamento do tempo de ciclo para a injeção de ABS, com os insertos escolhidos.

Gráfico 9 - Injeção de ABS para cada material do inserto.

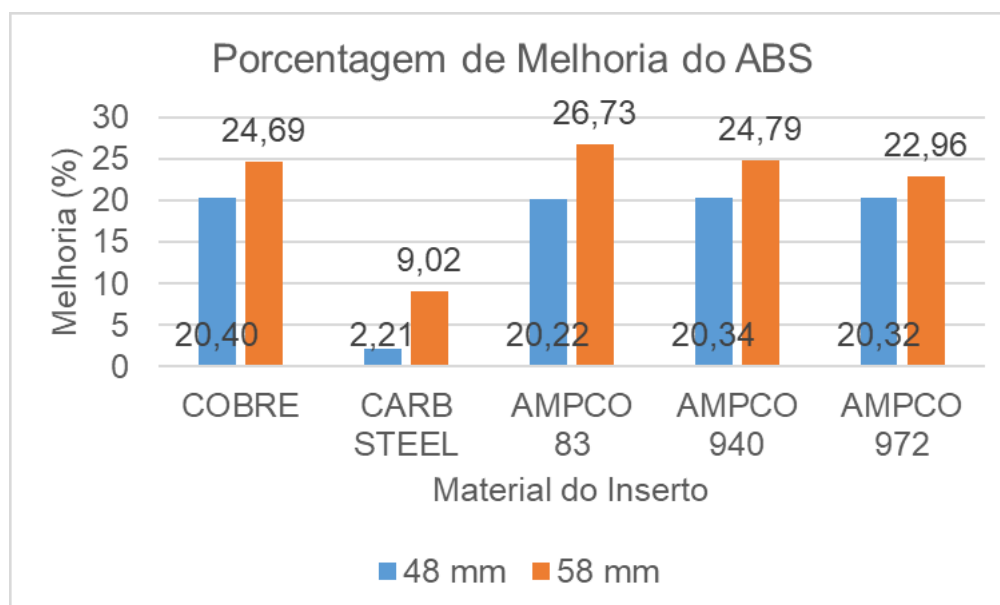


Fonte: Autor (2018).

Para a injeção do ABS, o tempo de ciclo entre os insertos manteve – se entre 44,3 segundos e 54,4 segundos. Os insertos de cobre, Ampcoloy® 940 e Ampcoloy® 972, apresentaram tempo de ciclo igual, sendo esse o menor para os canais com 48 mm de distância.

Para a configuração com 58 mm de distância, a liga Ampcoloy® 83 teve o menor tempo de ciclo, sua eficiência e a dos demais é representada no Gráfico 10.

Gráfico 10 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do ABS.

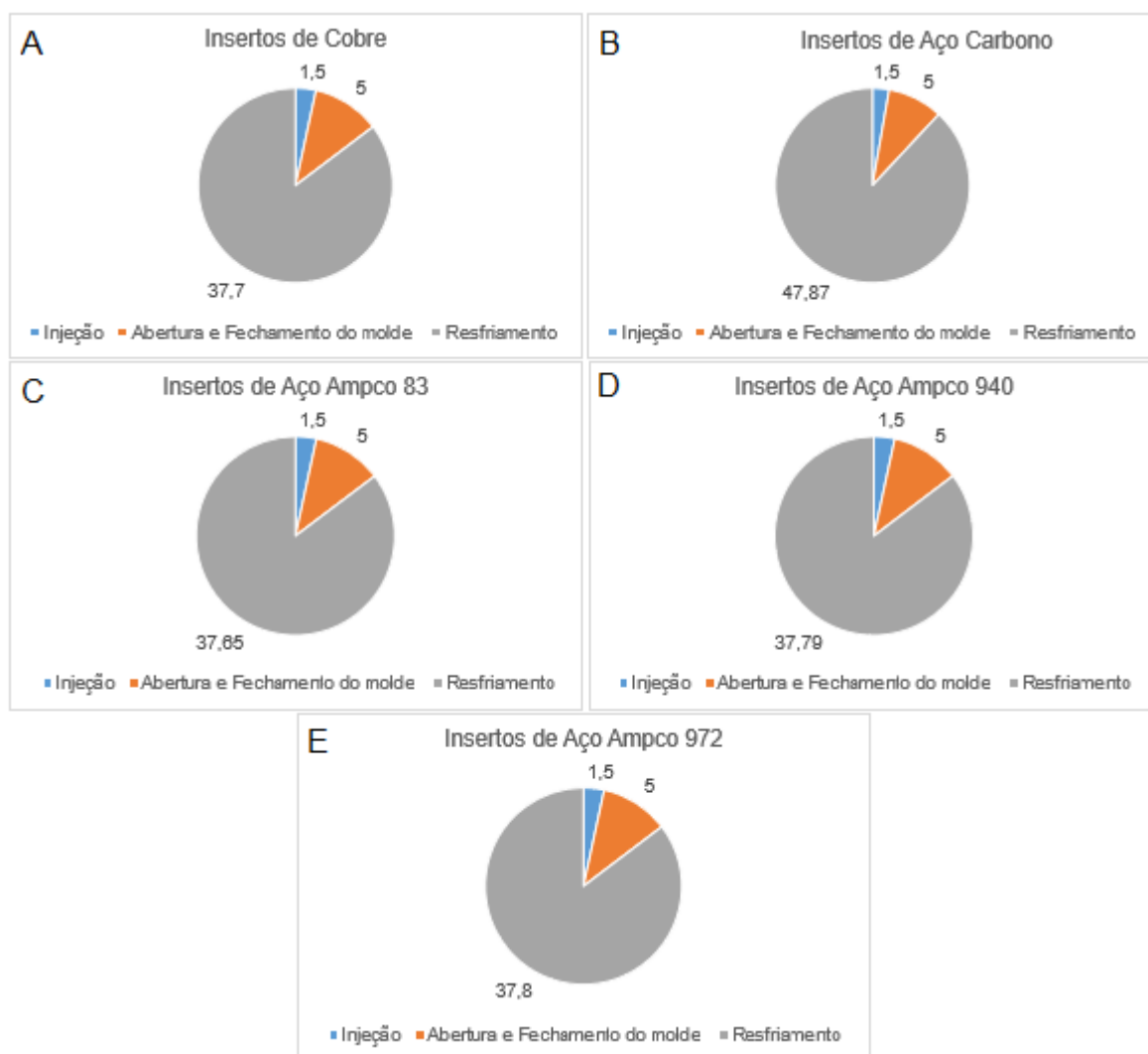


Fonte: Autor (2018)..

Na injeção de ABS o inserto de liga Ampcoloy® 83 também teve a porcentagem de eficiência mais elevada, 26,73% de redução no tempo de ciclo, com distância de 58 mm entre os canais. O inserto de aço carbono teve a menor diminuição em relação ao padrão em aço H13, com 2,21% de redução.

O Gráfico 11 (A,B,C,D,E) apresenta o tempo dos processos que compõem o tempo total de ciclo para cada inserto utilizado e distância de 48 mm.

Gráfico 11 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do ABS com cada inserto e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.

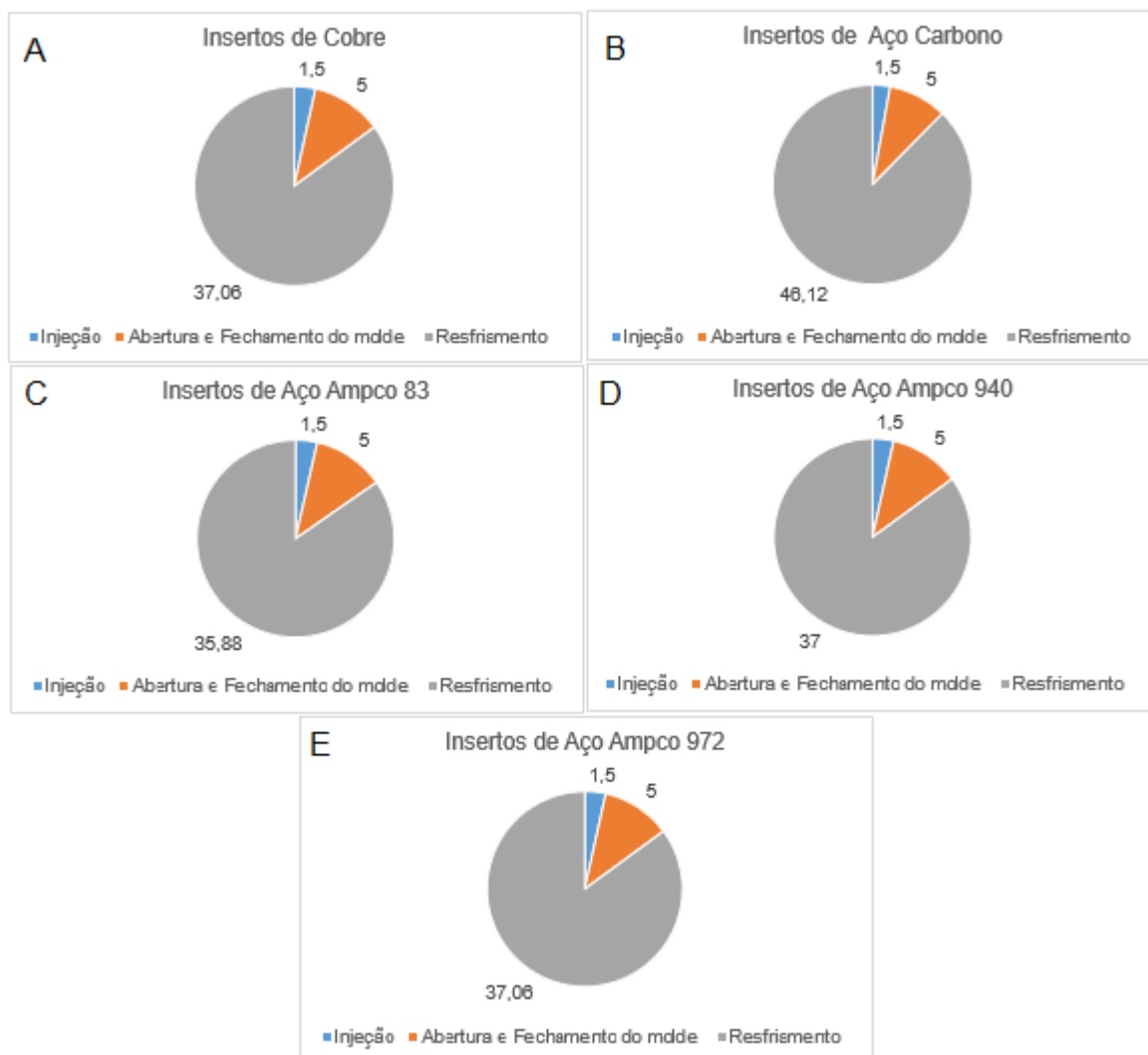


Fonte: Autor (2018).

No gráfico (C), acima é possível ver que a maior redução no tempo de resfriamento para esta configuração acontece para o sistema com insertos de liga Ampcoloy® 83.

O tempo de ciclo igual a 42,4 segundos para distância de 58 mm, que foi o menor tempo de ciclo obtido para a injeção de ABS, ocorreu também para o inserto de liga Ampcoloy® 83, e é o resultado da diminuição do tempo de resfriamento como mostra o Gráfico 12 C.

Gráfico 12 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do ABS com cada inserto e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.



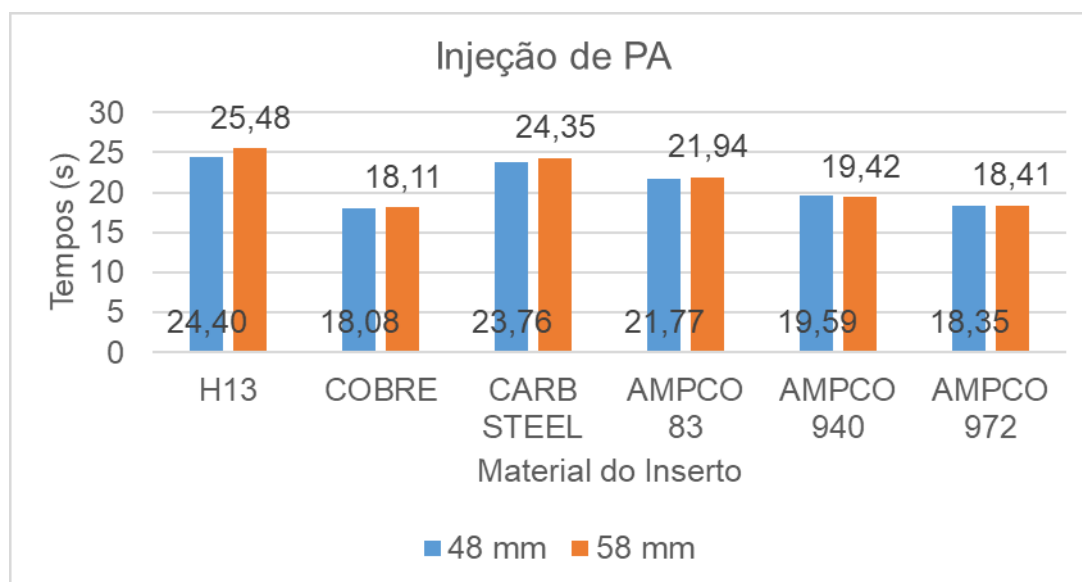
Fonte: Autor (2018).

4.3.4 Simulação de Injeção do PA

O PA foi o polímero com maior condutividade térmica simulado, 0,49 W/m°C, obteve reduções consideráveis no tempo de ciclo, a média, considerando todas as simulações, foi de 21,14 segundos. Há pouca variação no tempo de ciclo entre o

sistema com 48 mm de distância entre canais para o sistema com 58 mm, para o mesmo material de inserto. Os resultados para a injeção desse material são podem ser vistos no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Injeção de PA para cada material do inserto.

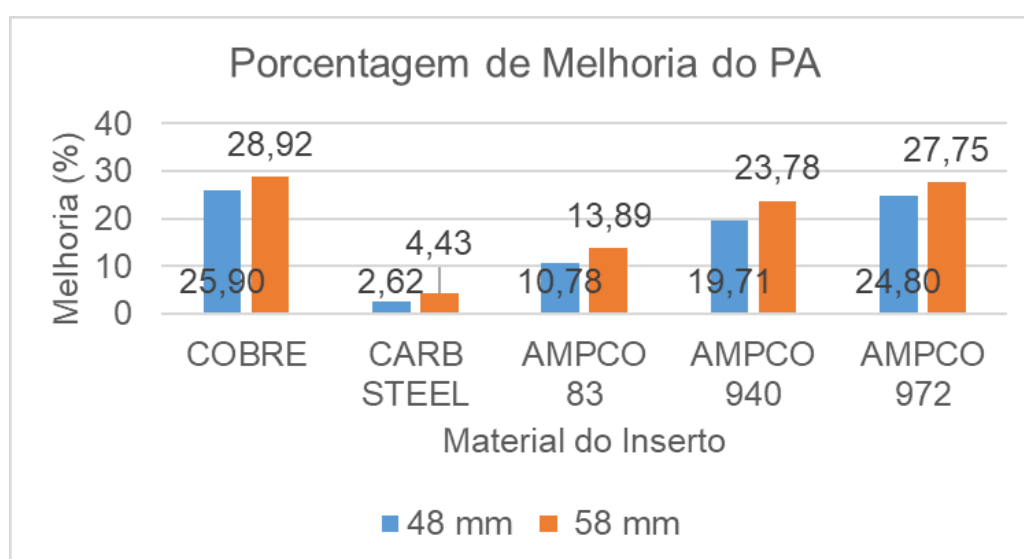


Fonte: Autor (2018).

Para esse caso, o menor tempo de ciclo ocorreu para o sistema com insertos de cobre, tanto para a distância entre canais de 48 mm como para 58 mm, o maior tempo de ciclo para as duas distâncias ocorreu para o inserto de aço carbono.

Gráfico 14 mostra qual foi a porcentagem de redução do tempo de ciclo para cada inserto.

Gráfico 14 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do PA.

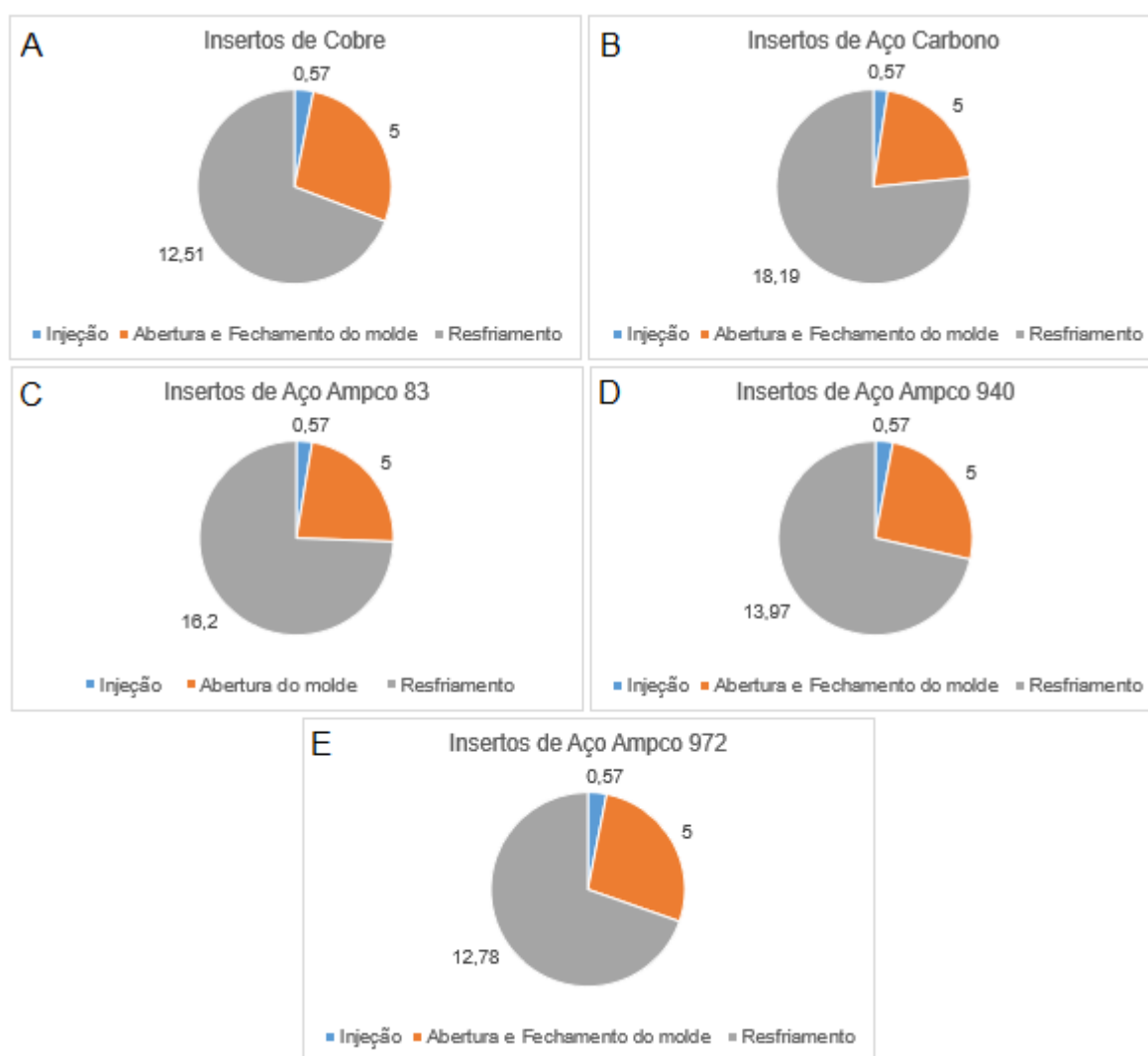


Fonte: Autor (2018).

O PA apresentou os tempos de ciclo baixos, a melhor porcentagem eficiência para a injeção desse material é de 28,9%, com a distância de 58 mm entre canais e insertos de cobre, mas o menor tempo de ciclo acontece com 48 mm entre canais, também com os insertos de cobre.

O tempo total para cada processo que compõe o tempo de ciclo, para 48 mm de distância são apresentados no Gráfico 15 (A,B,C,D,E).

Gráfico 15 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PA com cada insertos e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.

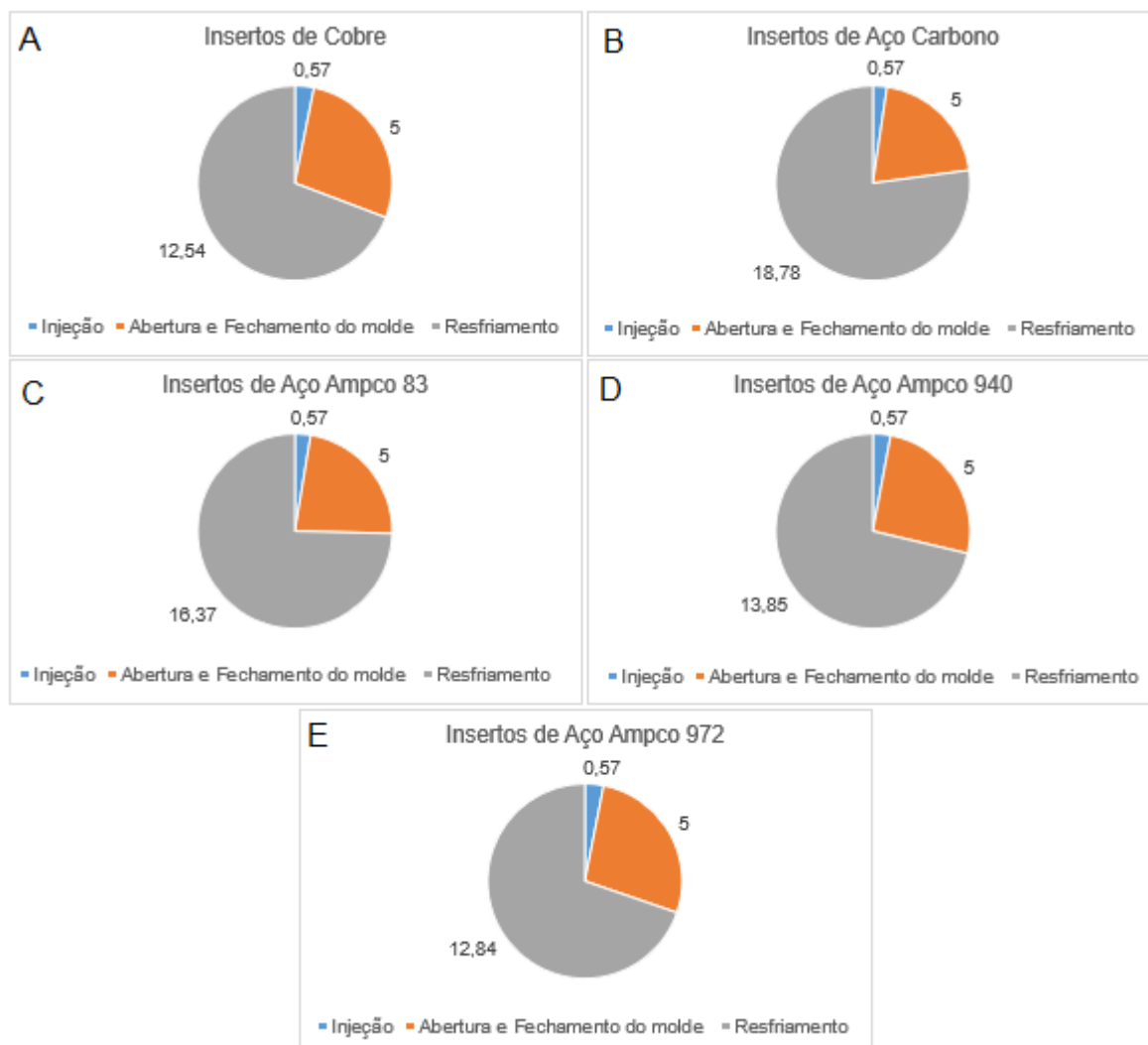


Fonte: Autor (2018).

No gráfico E acima podemos observar que o tempo de resfriamento do PA para o sistema com inserto de cobre é o menor, em relação aos outros. Gráfico 16 A, mostra a parcela do tempo de resfriamento para o sistema com insertos de cobre e

58 mm de distância, que embora não seja o menor tempo para o ciclo de injeção de PA, obteve a maior porcentagem de redução.

Gráfico 16 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PA com cada insertos e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.

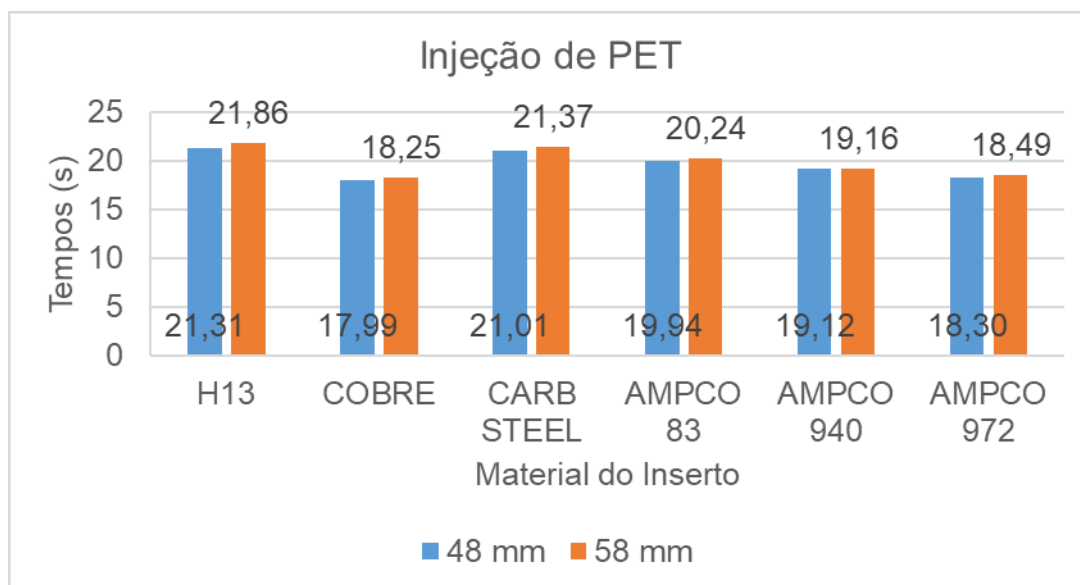


Fonte: Autor (2018).

4.3.5 Simulação de Injeção do PET

A simulação de injeção com PET apresentou os menores tempos de ciclo entre os materiais simulados, a média de tempo das simulações foi de 19,75 segundos, possui condutividade térmica de 0,30 W/m°C. Os resultados podem ser observados no Gráfico 17.

Gráfico 17 - Injeção de PET para cada material do inserto.



Fonte: Autor (2018).

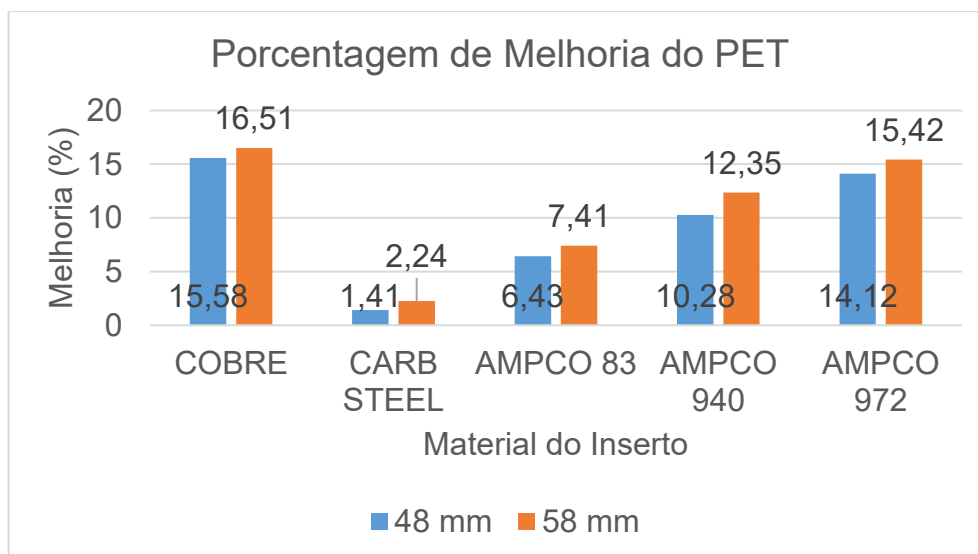
As simulações com injeção de PET, também não mostraram muita variação entre o tempo de ciclo para 48 mm e 58 mm de distância entre os canais. O menor tempo de ciclo ocorreu com a utilização de insertos de cobre, para 48 mm e 58 mm entre canais, 17,99 segundos e 18,25 segundos, respectivamente.

Embora a condutividade térmica seja menor que a do PA, o PET apresentou menores tempos de ciclo, pois possui menor calor específico, ou seja, precisa de menos energia, para que cada grama do material varie sua temperatura em 1°C.

O maior tempo foi apresentado pelo inserto de aço carbono novamente, 21,01 segundos quando a distância é 48 mm e 21,37 segundos quando a distância é 58 mm.

A melhora em relação ao sistema sem insertos é apresentada no Gráfico 18.

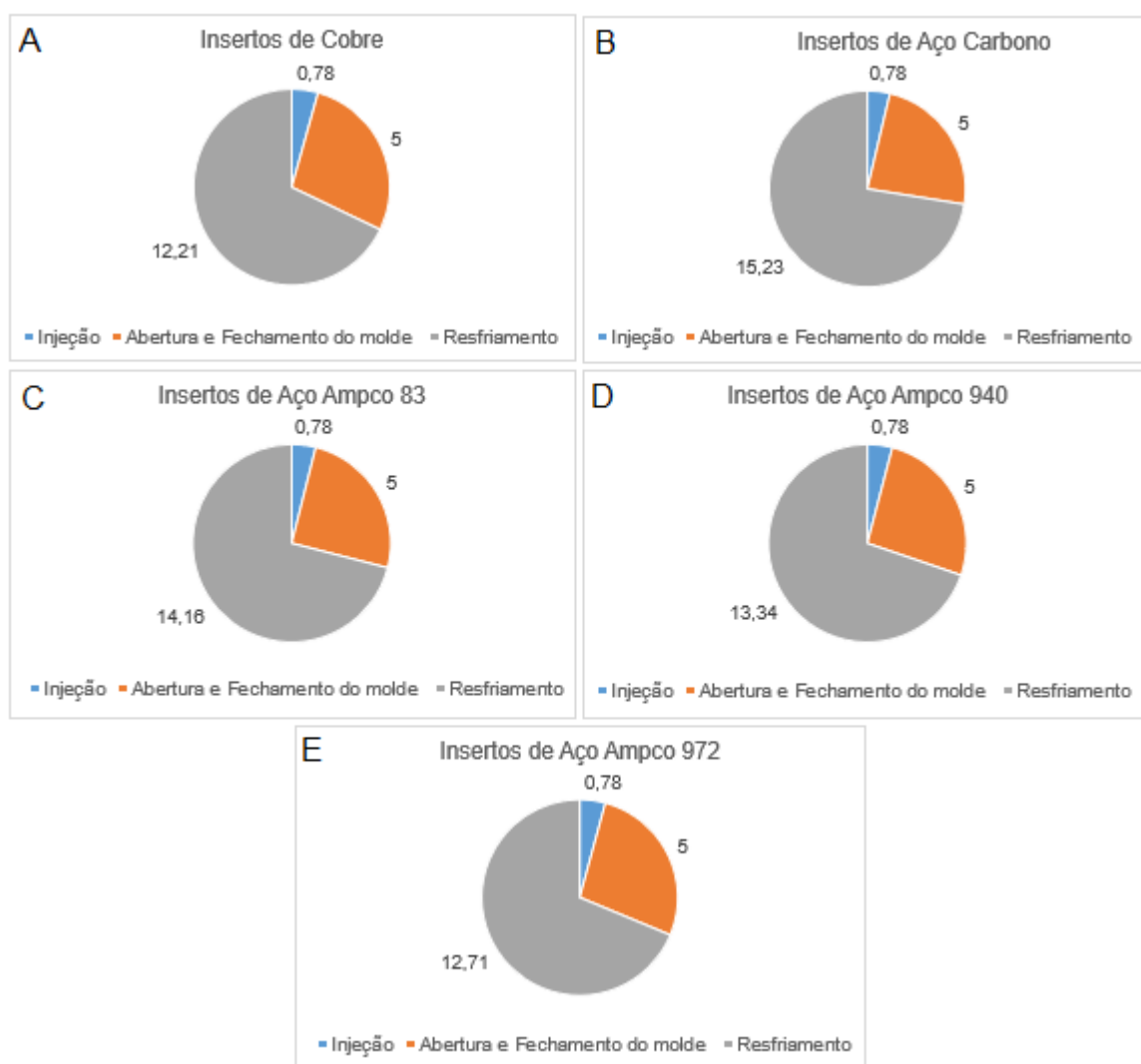
Gráfico 18 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do PET.



Fonte: Autor (2018).

No gráfico podemos ver a que o cobre obteve 15,58% de diminuição no tempo de ciclo com 48 mm de distância e 16,51% para 58 mm. Podemos ver no Gráfico 19 (A,B,C,D,E), as parcelas de tempo que compõem o tempo total de ciclo para cada sistema com insertos e 48 mm de distância.

Gráfico 19 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PET, com cada insertos e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.

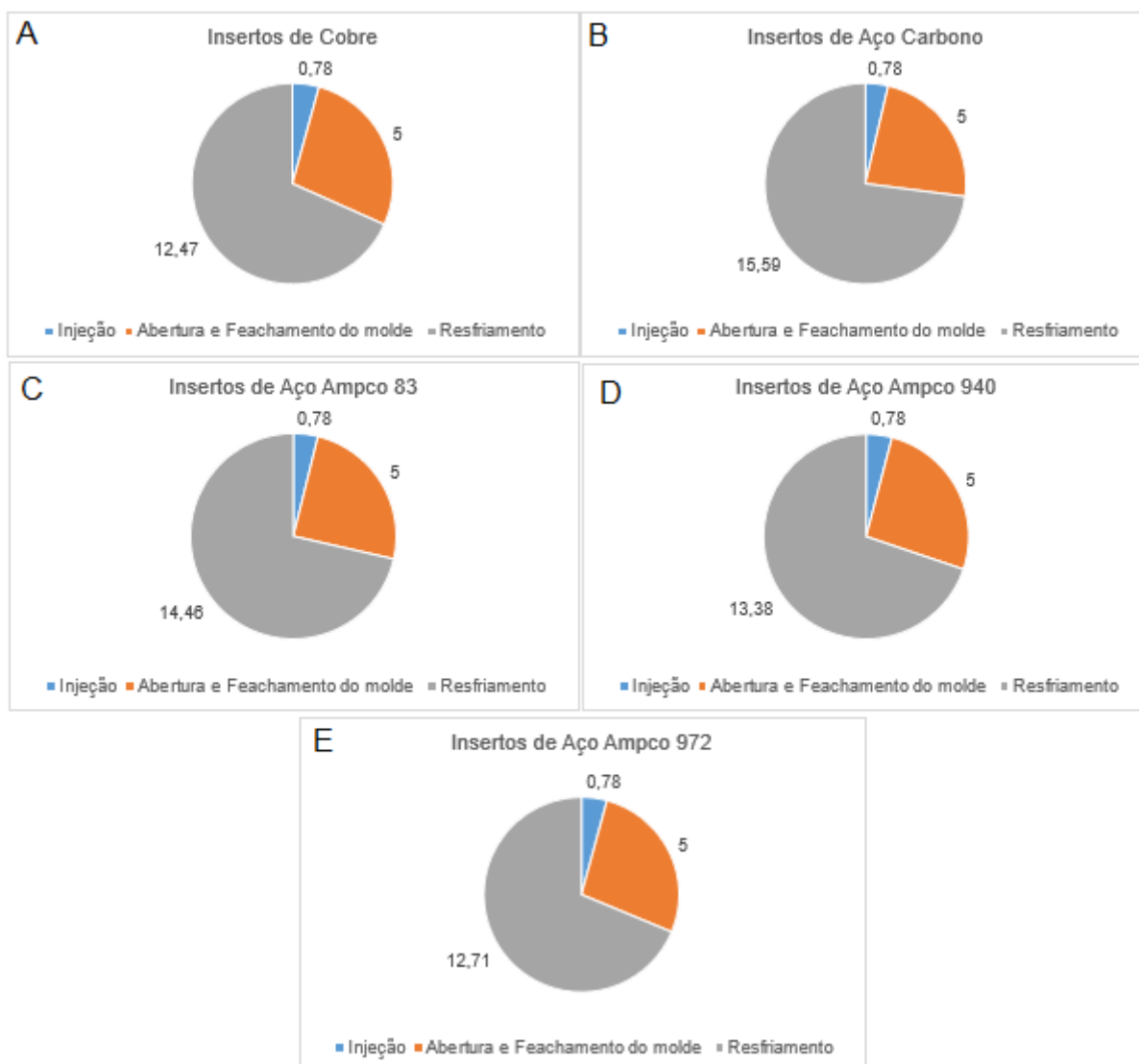


Fonte: Autor (2018).

Os gráficos apresentados acima mostram que o tempo mais curto de resfriamento para o PET ocorre com inserto de cobre (Gráfico A) seguido do sistema com insertos de liga Ampcoloy® 972 (Gráfico E).

Os tempos de ciclo para o sistema com canais de refrigeração com 58 mm de distância não apresentam grandes variações em relação ao sistema com 48 mm de distância. O Gráfico 20 (A,B,C,D,E) apresenta a composição do tempo total para cada placa de refrigeração nessa configuração.

Gráfico 20- Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PET, com cada insertos e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.



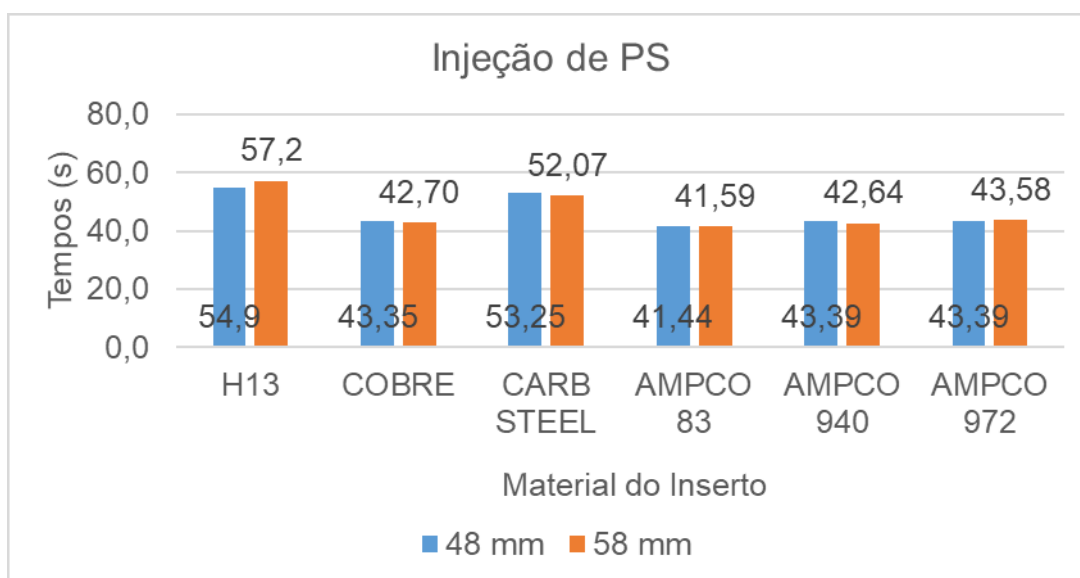
Fonte: Autor (2018).

Embora o tempo de ciclo seja mais curto para a injeção desse material o tempo de resfriamento continua sendo a parcela mais longa que compõe o tempo total do ciclo de injeção, comprovando o que diz a literatura. O tempo de empacotamento, que não está apresentado nos gráficos de tempos que compõem o ciclo de injeção, foi omitido, pois esse processo ocorre durante o tempo de resfriamento, não influenciando no tempo total do ciclo.

4.3.6 Simulação de Injeção do PS

O poliestireno é um polímero com estabilidade dimensional e baixa densidade, sua condutividade térmica é de $0,15 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e calor específico de $1975 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$. Possui características de injeção semelhantes ao PP e ao ABS, porém, apresentou menores tempos de ciclo por possuir coeficiente de calor específico menor. O Gráfico 21 apresenta os tempos de ciclo para as simulações realizadas.

Gráfico 21 - Injeção de PS para cada material do inserto.

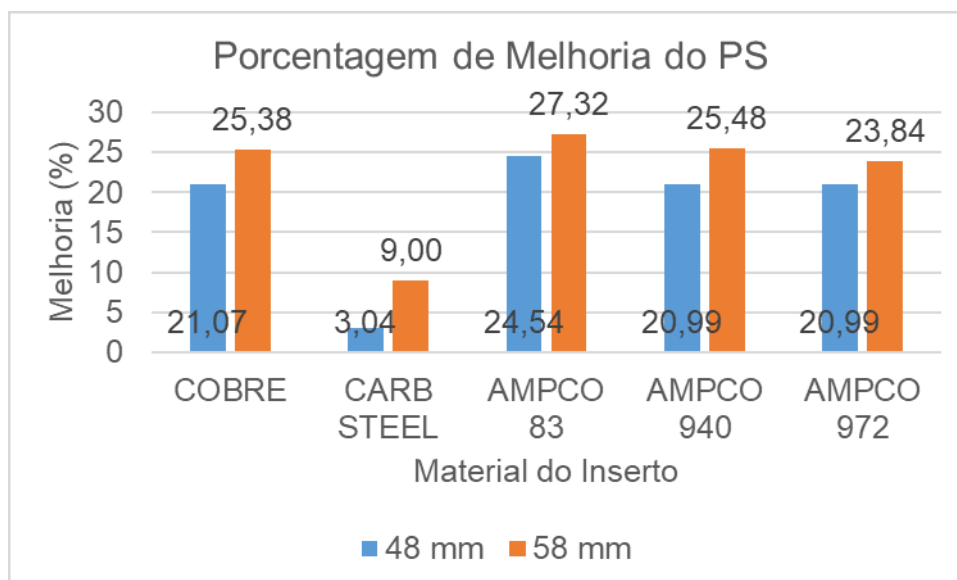


Fonte: Autor (2018).

O gráfico mostra que há pouca variação para os sistemas com insertos de Cobre, e as ligas Ampcoloy®. O menor tempo é observado com a utilização das placas de liga Ampcoloy® 83, para a análise de 48 mm, 41,44 segundos.

No Gráfico 22 é apresentado a melhoria do sistema com cada tipo de inserto.

Gráfico 22 - Porcentagem de melhoria no tempo de ciclo do PS.

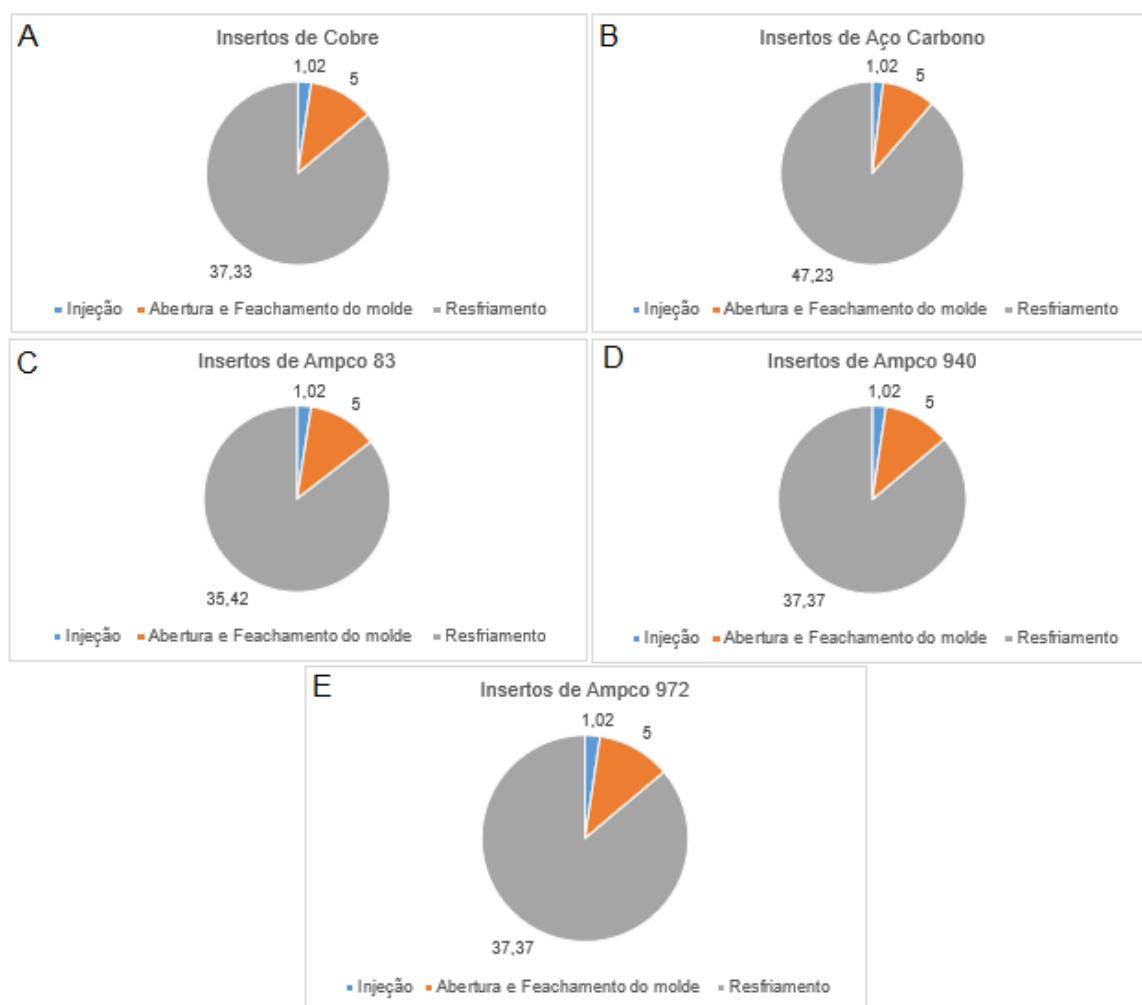


Fonte: Autor (2018).

O sistema que apresentou menor tempo de ciclo, citado anteriormente, teve melhoria de 24,54%, já a maior porcentagem de melhoria, 27,32%, ocorreu também com as placas de refrigeração de metal Ampcoloy® 83, para 58 mm de distância entre canais. Os insertos de aço carbono, como já era esperado, apresentou pouca melhoria em relação ao sistema padrão, por possuir condutividade térmica baixa, se comparado aos outros materiais.

O Gráfico 23 (A,B,C,D,E) apresenta o tempo de cada etapa que compõe o tempo de ciclo para o sistema com 48 mm entre os canais.

Gráfico 23 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PS, com cada insertos e 48 mm de distância entre canais de refrigeração.

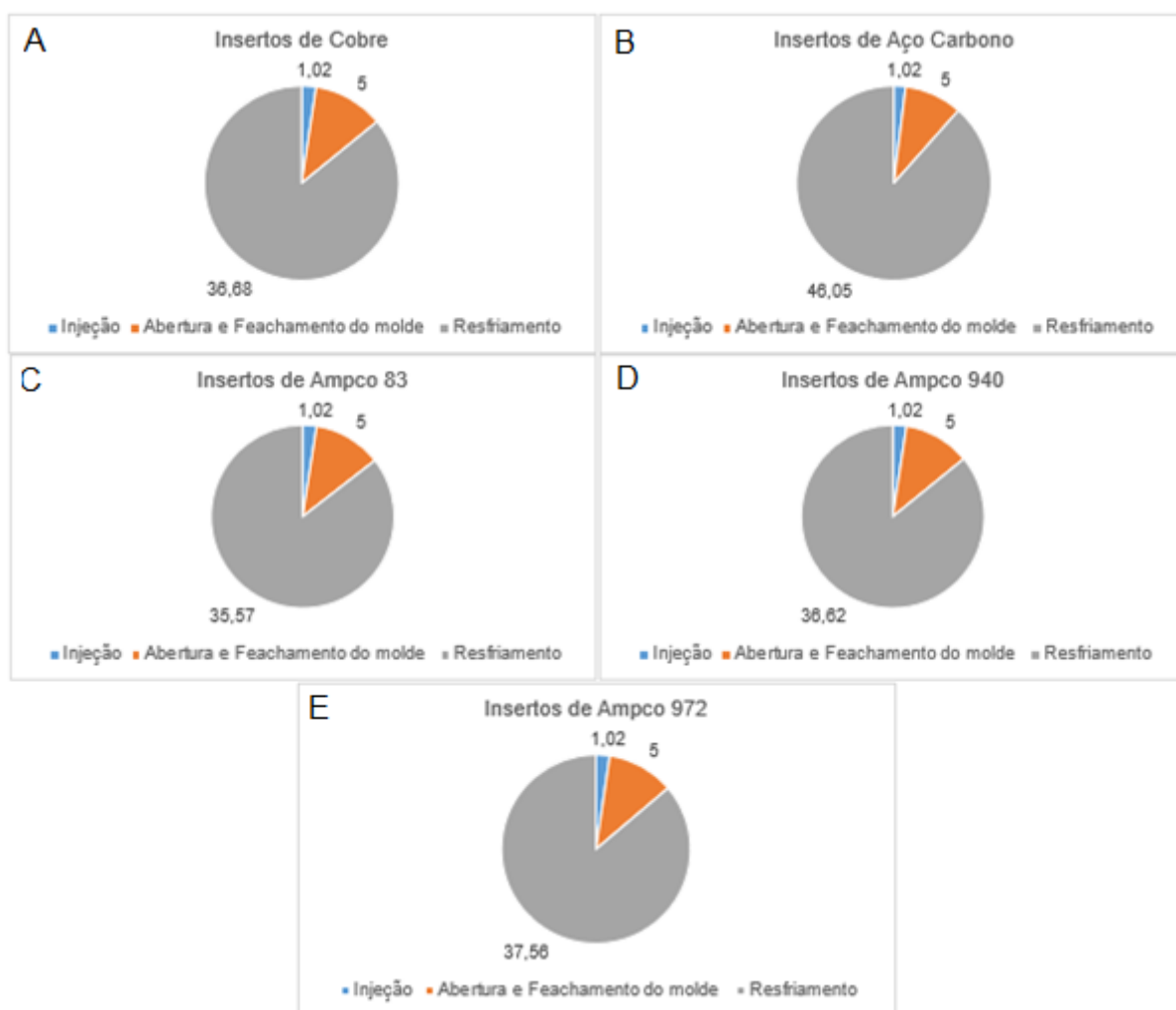


Fonte: Autor (2018).

O gráfico mostra como o tempo de resfriamento é próximo para os casos A, D e E, já para o caso C, aproximadamente 2 segundos mais curto, resultando no menor tempo de ciclo.

No Gráfico 24 estão os tempos de resfriamento, injeção e abertura e fechamento do molde, para a análise de 58 mm.

Gráfico 24 - Tempos (s) que compõem o ciclo de injeção do PS, com cada insertos e 58 mm de distância entre canais de refrigeração.



Fonte: Autor (2018).

Pelo gráfico pode-se perceber que, para alguns casos o tempo de resfriamento para o sistema de 58 mm é menor que o tempo de resfriamento para 48 mm de distância entre canais. Mostrando que, para esses casos, a construção do canal de refrigeração próximos a superfície da peça, pode não apresentar melhor eficiência.

5 CONCLUSÕES

Pode - se concluir, que um sistema que possui os canais de refrigeração em uma placa separada da placa porta cavidade, torna o ciclo de refrigeração mais eficiente, pois dessa maneira é possível trabalhar com combinações de materiais que possuem maior condutividade térmica, ou seja, dissipam o calor mais rapidamente.

As propriedades de condutividade térmica e calor específico, apresentaram grande influência no processo de troca de calor, tanto do material injetado, quanto do material das placas de refrigeração. Como foi possível observar na simulação de injeção de PET, onde a combinação da condutividade térmica elevada e baixo calor específico do PET, juntamente com materiais de condutividade térmica elevada como insertos, resultou em tempos de ciclo mais curtos.

Aparentemente, para esse sistema, utilizando materiais com condutividade térmica acima de $200 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, como insertos, a variação do tempo de ciclo é quase imperceptível, quando o tempo de injeção do polímero é mais alta. Como ocorre com o Cobre e as ligas Ampcoloy 940 e 970 que possuem $380 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, $206 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ e $320 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, respectivamente, para a injeção de PP e ABS.

Em todos os casos de injeção foi possível observar que o tempo mais longo do ciclo é correspondente ao resfriamento da peça. Por isso, é importante realizar estudos que ofereçam alternativas para aumentar a eficiência desse sistema.

As condições aplicadas nesse trabalho, como a configuração dos canais de refrigeração e diâmetro dos mesmos, são condições que já haviam sido testadas anteriormente por Berner (2016), e foram os parâmetros que mostraram maior eficiência no ciclo de injeção para esse modelo. Portanto antes de aplicar o inserto no molde, um estudo sobre as melhores condições e parâmetros ainda faz – se necessário. Pois encontrando as configurações ideais, associados à utilização de insertos, o ciclo apresentará resultados ainda mais satisfatórios. Pela Tabela 4, podemos citar o PA, que obteve o menor tempo de ciclo e melhor porcentagem de eficiência na maioria das simulações.

O intuito do inserto no molde não é apenas diminuir o tempo de ciclo da peça, mas também diminuir os gastos de fabricação dos moldes quando houver alteração

no modelo da peça, nesse caso os canais de refrigeração podem ser reaproveitados, assim apenas a cavidade será usinada na nova placa, poupando tempo e diminuindo gastos com usinagem.

RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade ao desenvolvimento do modelo proposto, sugere-se para futuros trabalhos:

- Realizar estudos sobre as melhores combinações entre materiais para injeção e materiais para insertos, a fim de obter ciclos de injeção mais eficientes.
- Analisar a influência de tempos de ciclo mais curtos na qualidade da peça.
- Fazer uma análise de custo do sistema com placas de refrigeração.
- Implementar o modelo proposto em um sistema especialista, para que a simulação seja mais completa e próxima possível da realidade.
- Construção do modelo proposto, para observar se os resultados práticos confirmam os resultados obtidos através das simulações.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Celso de. **Transmissão de calor**. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora S.a., 1978.

AUTODESK Simulation Moldflow Synergy (2014). Autodesk Inc. [Software]. Melbourne: Austrália.

BERNER, Jonas Ariel. **Análise e melhoria do sistema de refrigeração em moldes de injeção de termoplásticos**. 2016. 65 p. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Automotiva, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, SC. 2016.

BRITO, M. A.; MATOS, A.; MENDES, S. S. **Manual do projectista para moldes de injeção de plásticos: Sistema de controlo de temperatura**. Marina Grande: Centimfe, 2003.

CANATA Júnior, César Luiz. **Cobre e suas ligas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012. 5 p. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/CesarCanata.pdf>>. Acesso em: 6 out. 2017.

CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. São Paulo: Artliber Editora. 2006. 277 p.

CASTAGNA, Vinícius. **avaliação térmica da liga cobre berílio empregada na transferência de calor em insertos de moldes para injeção termoplástica**. 2014. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/bitstream/handle/11338/2006/TCC_ViniciusCastagna.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 abr. 2018.

ÇENGEL, Yunus A. **Transferência de calor e massa**. 3. ed. São Paulo: Mcgraw-hill Editora. 2009. 902 p.

ÇENGEL, Yunus A; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Amgh Editora Ltda. 2007.

CENTIMFE: CENTRO TECNOLÓGICA DA INDÚSTRIA DE MOLDES FERRAMENTAS ESPECIAIS E PLÁSTICOS (Org.). **Manual do projectista para moldes de injeção de plástico**. Marinha Grande, Portugal: 2003.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008a. 599 p.

DIAS, Kelly Patrícia. **Proposta de um modelo para a gestão do conhecimento no projeto de moldes de injeção**. 2008. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GABARDO, João Fredolim. **Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13**. 2008. 71 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Demec, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

GRANADA, Jonas Eichelberger. **Simulação da etapa de preenchimento no processo de moldagem por injeção**. 2012. 29 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Química, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

HARADA, Júlio. **Moldes para injeção de termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos**. São Paulo: Artliber, 2004. 310 p.

HARADA, Júlio; Ueki, Marcelo M. **Injeção de termoplásticos: produtividade com qualidade**. São Paulo: Artliber Editora, 2012.

KREITH, Frank. **Princípios da transmissão de calor**. 3 ed. São Paulo; Edgard Blücher, 1977.

LEÃES, Vinícius S. **Avaliação da influência da diferença de temperatura entre as placas de um molde de injeção no empenamento de peças injetadas**. 2008. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville. 2008.

LIGAS de alta condutividade. 2018. Disponível em: <<https://www.ampcometal.com/pt-br/>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. 2 ed. São Paulo: Artliber, 2013. 485 p.

MANRICH, Silvio. **Processamento de termoplástico: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. 1 ed. São Paulo: Artliber, 2005. 431 p

MARIN, Felipe et al. **Desenvolvimento de molde de injeção de plástico fabricado por manufatura aditiva metálica**. 2018. Disponível em: <<http://www.revistaferramental.com.br/artigo/desenvolvimento-de-molde-de-injecao-de-plastico-fabricado-por-manufatura-aditiva-metalica>>. Acesso em: 29 maio 2018.

MENGES, G., MOHREN, P. **How to make injection molds**. 2 ed. Munich: Hanser, 1993.

PAIVA, Maria da C. **Notas de aula**. Disciplina de Introdução aos polímeros, Mestrado em Engenharia de Polímeros, Departamento de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, Guimarães, PT, 2006. (Apostila).

PLÁSTICO na indústria automobilística. 2013. Tecnologia de Materiais. Disponível em:

<http://www.tecnologiademateriais.com.br/portal/noticias/plasticos_engenharia/2014/junho/automobilistica.html>. Acesso em: 05 jun. 2018.

PROVENZA, F. **Moldes para plásticos**. São Paulo: Pro-tec, 1993.

SACCHELLI, Carlos Maurício. CARDOSO, Christian Allan. **Análise da Simulação de Refrigeração no Processo de Injeção de Termoplásticos**. 8 Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cuzco, 2007.

REINERT, Adriano Francisco; SANTANA, Herto de Alencar. **Moldes de injeção**. Curitiba: Sociesc, 2014. 67 p.

SANTOS, Wildson; MÓL, Gerson. **Química cidadã**: química orgânica, eletroquímica, radioatividade, energia nuclear e a ética da vida. 1 ed.. São Paulo: Nova Geração, 2010. V.3.

SANTOS, Wilson N. dos; GREGÓRIO, Rinaldo. Propriedades Térmicas de Polímeros por Métodos Transientes de Troca de Calor. **Polímeros**: Ciência e Tecnologia, São Carlos Sp, v. 13, n. 4, p.265-269, 15 out. 2003.

SILVA, Sérgio Luis. **Sistemática para o projeto do sistema de refrigeração de moldes para injeção de polímeros**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

SILVA, Sérgio Luis; FORCELLINI, Fernando Antônio; SCALICE, Régis Kovacs. **Sistemas de refrigeração para moldes de injeção de termoplásticos**. Ferramental, Joinville, v. 35, n. 1, p.35-42, jun. 2011. Mensal. Disponível em: <https://issuu.com/revistaferramental8/docs/edi_o_36>. Acesso em: 08 nov. 2017.

SIMÕES, Carla L. et al. Environmental and economic performance of a car component: Assessing new materials, processes and designs. **Journal Of Cleaner Production**. Guimarães, POR, p. 105-117. 1 abr. 2016.

TECNOLOGIA Mecânica: Informações Gerais sobre Aços. Informações Gerais sobre Aços. São Paulo: Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo, 2001. 16 p.

TELLES, Ilka Cristina Fernandes de Souza. **Um modelo em rede de petri para o sistema automático de injeção de uma máquina injetora de plástico**. 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VOJNOVÁ, Eva. The benefits of a conforming cooling systems the molds in injection moulding process. **Procedia Engineering**. Nový Smokovec, p. 535-543. 10 jun. 2016.

YOUNG, Hugh D; FREEDMAN, Roger, A. **Física II**: termodinâmica e ondas. 12 ed. São Paulo: Pearson. 2008.

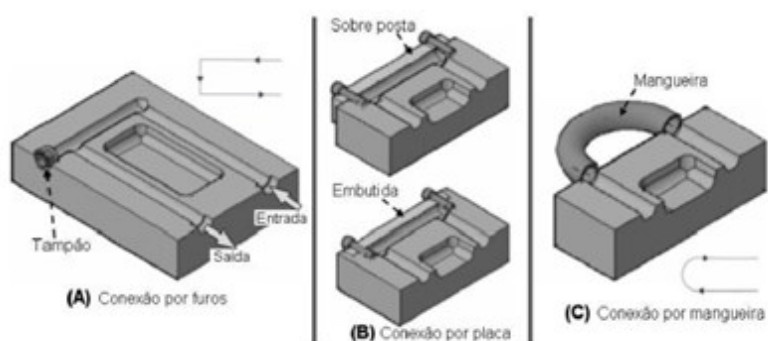
APÊNDICE A

APÊNDICE A– Modelos de sistemas de refrigeração.

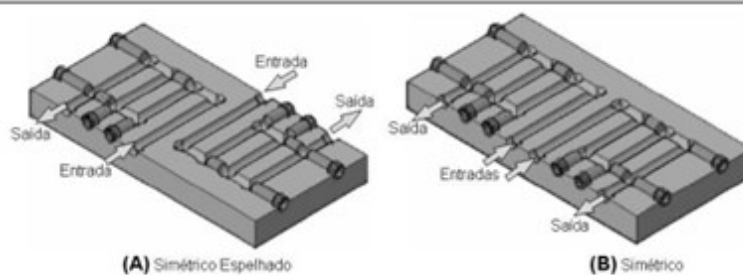
Sistema de refrigeração

Exemplo

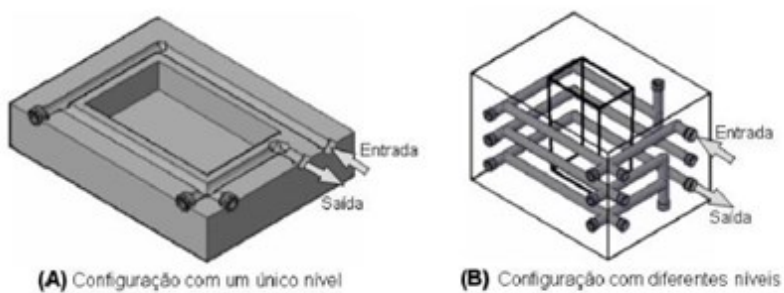
Furação com circuito em U



Furação com circuito em Z

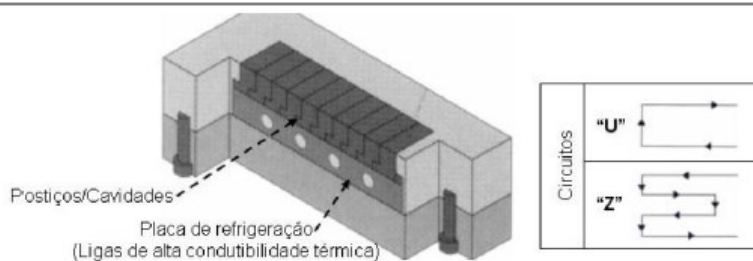


Furação com circuito retangular

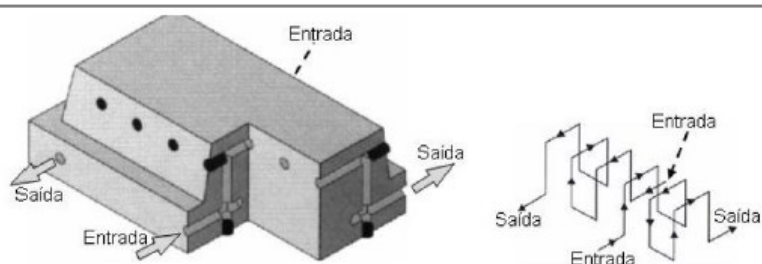


APÊNDICE A – Modelos de sistemas de refrigeração. (Continuação)

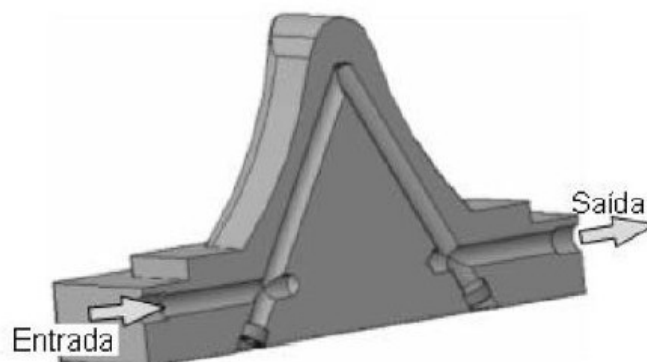
Furação em placas com alta condutibilidade térmica



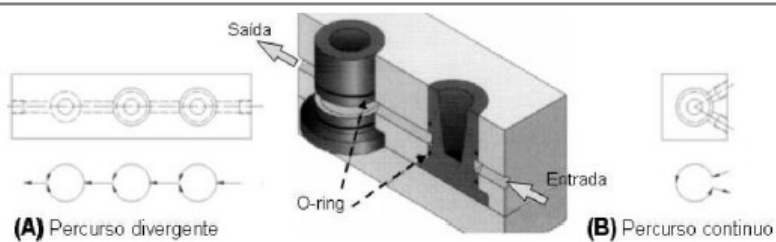
Furação com circuito usinado direto no postigo



Furação com circuito inclinado

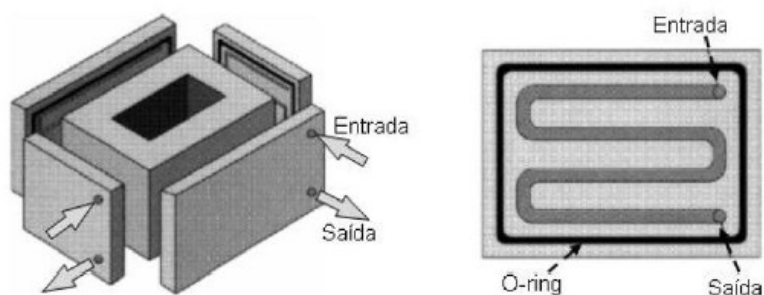


Canal usinado para cavidade circular

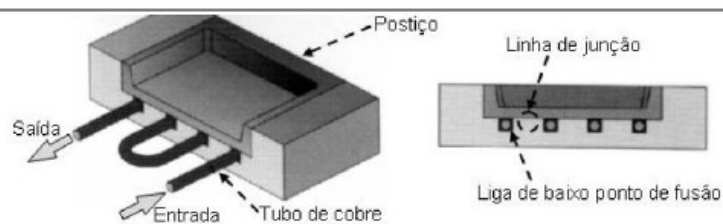


APÊNDICE A – Modelos de sistemas de refrigeração. (Continuação)

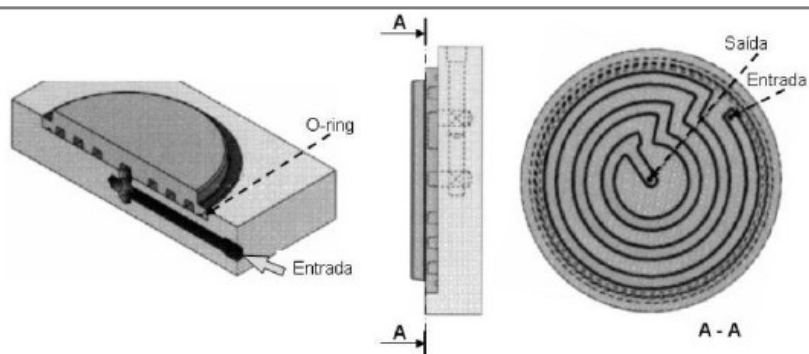
**Canal de circuito de
“placas de
refrigeração”**



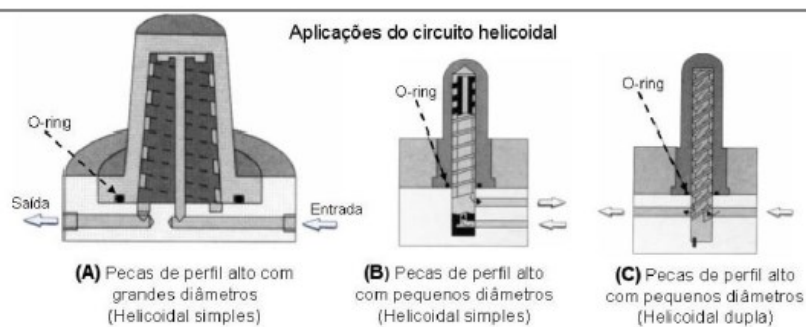
**Canal usinado com
aplicação de tubos de
cobre**



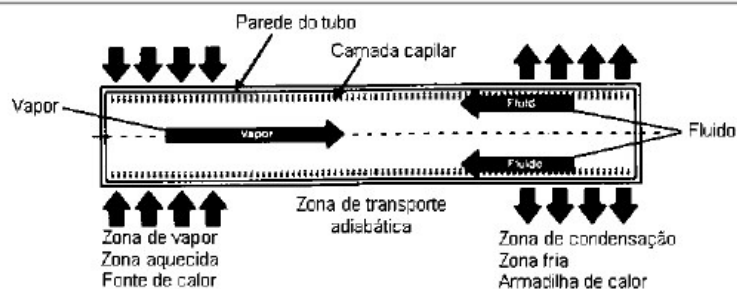
**Canal usinado em
espiral**



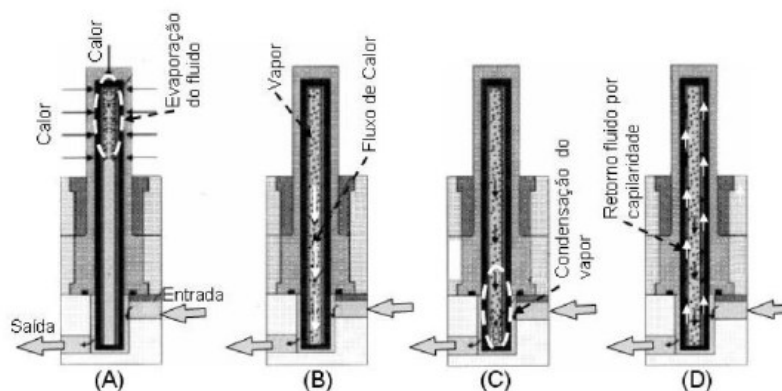
**Canal usinado em
helicoidal**



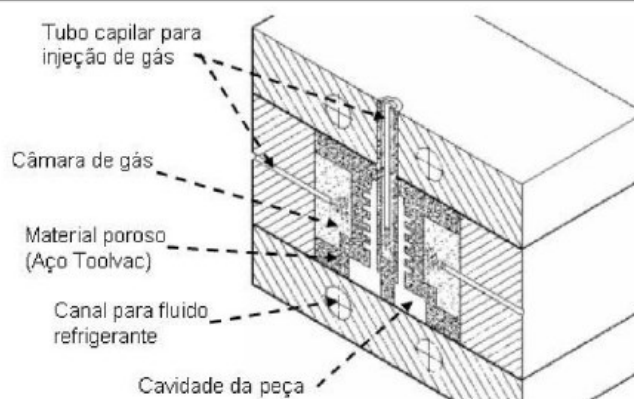
APÊNDICE A – Modelos de sistemas de refrigeração. (Continuação)



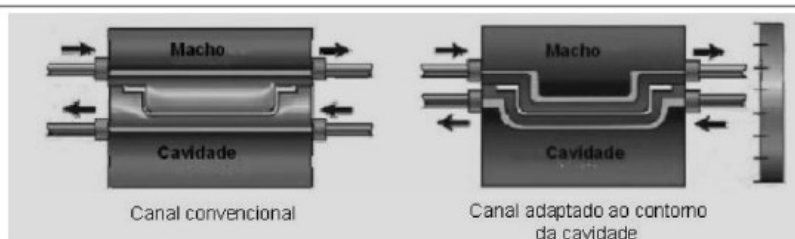
Tubos transferidores de calor



Refrigeração a gás



Canais para resfriamento adaptados ao contorno da peça



ANEXO A

ANEXO A - Condutividade térmica vs dureza, para ligas Ampcoloy e aços ferramenta.

